

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Nino Kolesar

Zagreb, 2011.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKIRAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Slaven Dobrović, dipl. ing.

Student:

Nino Kolesar

Zagreb, 2011.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Slavenu Dobroviću na pruženoj pomoći tijekom izrade ovog rada. Također veliko hvala i gospodinu Damiru Božičeviću iz TE-TO Zagreb koji mi je pružio potrebne podatke za ovaj rad.

Zahvaljujem se mojim roditeljima na potpori od prvog dana mog školovanja te ovaj rad posvećujem samo njima.

Nino Kolesar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: Nino Kolesar

Mat. br.: 0035158970

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Priprema vode za sustave toplinskih mreža**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Water treatment for district water heating systems**

Opis zadatka:

U sustavima toplinskih mreža kao medij za prijenos energije najčešće se koristi voda. Problemi koji se pritom javljaju odnose se na taloženje inkrustacija i koroziju u cjevovodima i opremi distribucijskog sustava.

U okviru diplomskog rada potrebno je analizirati sljedeća tehnološka rješenja za pripremu vode:

- ionsko umekšavanje,
- membranska nanofiltracija,
- reverzna osmoza,
- kemijsko kondicioniranje.

Razradu rješenja je potrebno provesti na primjeru zagrebačke termoelektrane TE-TO Zagreb. Svaku tehnološku varijantu treba razraditi na razini idejnog rješenja uključujući sljedeće:

- osnovna tehnološka shema,
- osnovni proračun opreme i uređaja,
- tehnički opis,
- proračun potrošnje kemikalija i energije,
- osnovna dispozicija opreme, zahtjevi na prostor,
- procjena investicijskih i pogonskih troškova.

U posebnom poglavlju diplomskog rada potrebno je usporediti tehnološke varijante te istaknuti njihove prednosti i nedostatke.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

08. rujna 2011.

Rok predaje rada:

10. studenog 2011.

Predviđeni datumi obrane:

16. – 18. studenog 2011.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Slaven Dobrović

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKA OSNOVA	3
2.1. Ionska izmjena	3
2.1.1. Metode regeneracije.....	3
2.1.2. Karakteristike ionskih izmjenjivača.....	4
2.2. Membranski postupci	6
2.2.1. Membrana	7
2.2.2. Dizajn membranskih sustava	9
2.2.3. Reverzna osmoza	11
2.2.4. Nanofiltracija	12
3. OPIS POSTOJEĆEG STANJA U TE-TO ZAGREB.....	13
4. TEHNOLOGIJE ZA NADOPUNU VODE	17
4.1. Demineralizacija u dva stupnja opremljena otplinjivačem CO ₂ sa istostrujnom regeneracijom.....	18
4.1.1. Jako kisela kationska izmjena - (K2)	19
4.1.1.1. Proračun potrošnje kemikalija	19
4.1.1.2. Proračun posude za regeneraciju.....	20
4.1.1.3. Proračun veličina filtra.....	21
4.1.2. Otplinjivač CO ₂	22
4.1.2.1. Proračun potrošnje kemikalija	23
4.1.2.2. Proračun veličina uređaja.....	23
4.1.3. Spremnik dekaionirane vode.....	24
4.1.3.1. Proračun potrošnje kemikalija	24
4.1.3.2. Proračun veličina uređaja.....	24
4.1.4. Jako bazna anionska izmjena - (A2)	26
4.1.4.1. Proračun potrošnje kemikalija	26
4.1.4.2. Proračun posude za regeneraciju.....	27
4.1.4.3. Proračun veličina filtra.....	28
4.1.5. Potrošnja energije linije za demineralizaciju	30
4.1.6. Dispozicija opreme i zahtjevi na prostor.....	31
4.1.7. Ekonomska analiza	32
4.1.7.1. Investicijski troškovi.....	33
4.1.7.2. Pogonski troškovi.....	33
4.2. Reverzna osmoza	34
4.2.1. Potrošnja kemikalija.....	36
4.2.2. Potrošnja energije.....	36
4.2.3. Dispozicija opreme i zahtjevi na prostor.....	37

4.2.4. Ekonomska analiza	37
4.2.4.1. Investicijski troškovi	38
4.2.4.2. Pogonski troškovi	38
4.3. Nanofiltracija	39
4.3.1. Potrošnja kemikalija	41
4.3.2. Potrošnja energije	41
4.3.3. Dispozicija opreme i zahtjevi na prostor	42
4.3.4. Ekonomska analiza	42
4.3.4.1. Investicijski troškovi	43
4.3.4.2. Pogonski troškovi	43
4.4. Kemijsko kondicioniranje	44
4.4.1. Potrošnja kemikalija	44
4.4.2. Potrošnja energije	44
4.4.3. Dispozicija opreme i zahtjevi na prostor	45
4.4.4. Ekonomska analiza	45
4.4.4.1. Investicijski troškovi	45
4.4.4.2. Pogonski troškovi	45
4.5. Tehnološke sheme sustava	46
5. USPOREDBA REZULTATA	50
5.1. Specifična potrošnja energije	50
5.2. Investicijski troškovi	50
5.3. Pogonski troškovi	51
6. ZAKLJUČAK	52
PRILOZI	53
LITERATURA	54

POPIS SLIKA

Slika 1.	Funkcionalna shema vrelovoda	2
Slika 2.	Shematski prikaz membranskih postupaka	9
Slika 3.	Shematski prikaz dva temeljna rada modula: jednoizlazni i ukriženi tok	10
Slika 4.	Pojednostavljena shema vrelovodnog sustava TE-TO Zagreb.....	13
Slika 5.	Shema linije za demineralizaciju.....	18
Slika 6.	Smještaj opreme linije za demineralizaciju	32
Slika 7.	RO sustav.....	34
Slika 8.	Membrana HRLE-440i	36
Slika 9.	Smještaj RO sustava	37
Slika 10.	NF sustav	39
Slika 11.	Membrana NF90-400	41
Slika 12.	Smještaj NF sustava	42
Slika 13.	Shema kemijskog kondicioniranja	44
Slika 14.	Tehnološka shema linije za demineralizaciju.....	46
Slika 15.	Tehnološka shema RO sustava.....	47
Slika 16.	Tehnološka shema NF sustava	48
Slika 17.	Tehnološka shema kemijskog kondicioniranja	49
Slika 18.	Usporedba specifične potrošnje energije.....	50
Slika 19.	Usporedba investicijskih troškova.....	50
Slika 20.	Usporedba pogonskih troškova	51

POPIS TABLICA

Tablica 1. Pregled mehanizama separacije.....	7
Tablica 2. Područje primjene različitih membranskih postupaka	8
Tablica 3. Usporedba koeficijenata zadržavanja između nanofiltracije i reverzne osmoze...	12
Tablica 4. Obavezni parametri	14
Tablica 5. Gubici vode u mreži	15
Tablica 6. Kvaliteta demi vode.....	15
Tablica 7. Voda vrelovodnog sustava prema VGB smjernicama (VGB-M410N.1994).....	16
Tablica 8. Kvaliteta Zagrebačke vode	17
Tablica 9. Popis opreme linije za demineralizaciju.....	32
Tablica 10. Procjena investicijskih troškova linije za demineralizaciju.....	33
Tablica 11. Protoci i tlakovi RO sustava	35
Tablica 12. Kvaliteta vode RO sustava	35
Tablica 13. Popis opreme RO sustava.....	37
Tablica 14. Procjena investicijskih troškova RO sustava.....	38
Tablica 15. Protoci i tlakovi NF sustava	39
Tablica 16. Kvaliteta vode NF sustava.....	40
Tablica 17. Popis opreme NF sustava	42
Tablica 18. Procjena investicijskih troškova NF sustava	43

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
AT	mval/l	ukupna anionska tvrdoća
AT ₁	mval/l	anionska tvrdoća jedan
AT ₂	mval/l	anionska tvrdoća dva
BT	mval/l	bazna tvrdoća
C	mg/l	koncentracija tvari u ulaznoj vodi
C _p	mg/l	koncentracija tvari u permeatu
c _p	m/h	protočna brzina vode
d	mm	promjer posude
F _p	m ²	površina posude
H	mm	visina posude
H _m	m	visina ionske mase
H _s	m	visina slobodnog prostora
H _{pr}	mm	visina Raschigovih prstena
K _k	val/l	korisni volumni kapacitet ionskog izmjenjivača
P	kW	snaga
R	-	stupanj zadržavanja
s	mm	debljina stijenke plašta
Q	m ³ /h	volumni protok
V	m ³	volumen spremnika dekontaminirane vode
V _m	m ³	volumen mase ionskog filtra
V _p	l	volumen posude za regeneraciju
V _z	m ³ zraka/h	količina zraka
τ	h	vrijeme između dvije regeneracije

SAŽETAK

U ovom radu analizirano je nekoliko tehnoloških rješenja za pripremu vode koja bi se mogla koristiti za nadopunu vode sustava vrelovoda TE-TO Zagreb.

Uvodno je opisano postojeće stanje vrelovodnog sustava uključujući podatke o kvaliteti vode, gubicima, temperaturi i protocima.

Analizirana su sljedeća tehnološka rješenja:

- Demineraizacija ionskom izmjenom u dva stupnja opremljena otplinjivačem CO₂
- Demineralizacija postupkom reverzne osmoze,
- Djelomična demineralizacija membranskom nanofiltracijom, i
- Kemijsko kondicioniranje vode.

Za svaku od varijanti napravljen je proračun, prikazan je smještaj opreme i načinjena je jednostavna ekonomska analiza. Isto tako, dane su tehnološke sheme varijanti te je načinjena usporedba uz navođenje prednosti i nedostataka.

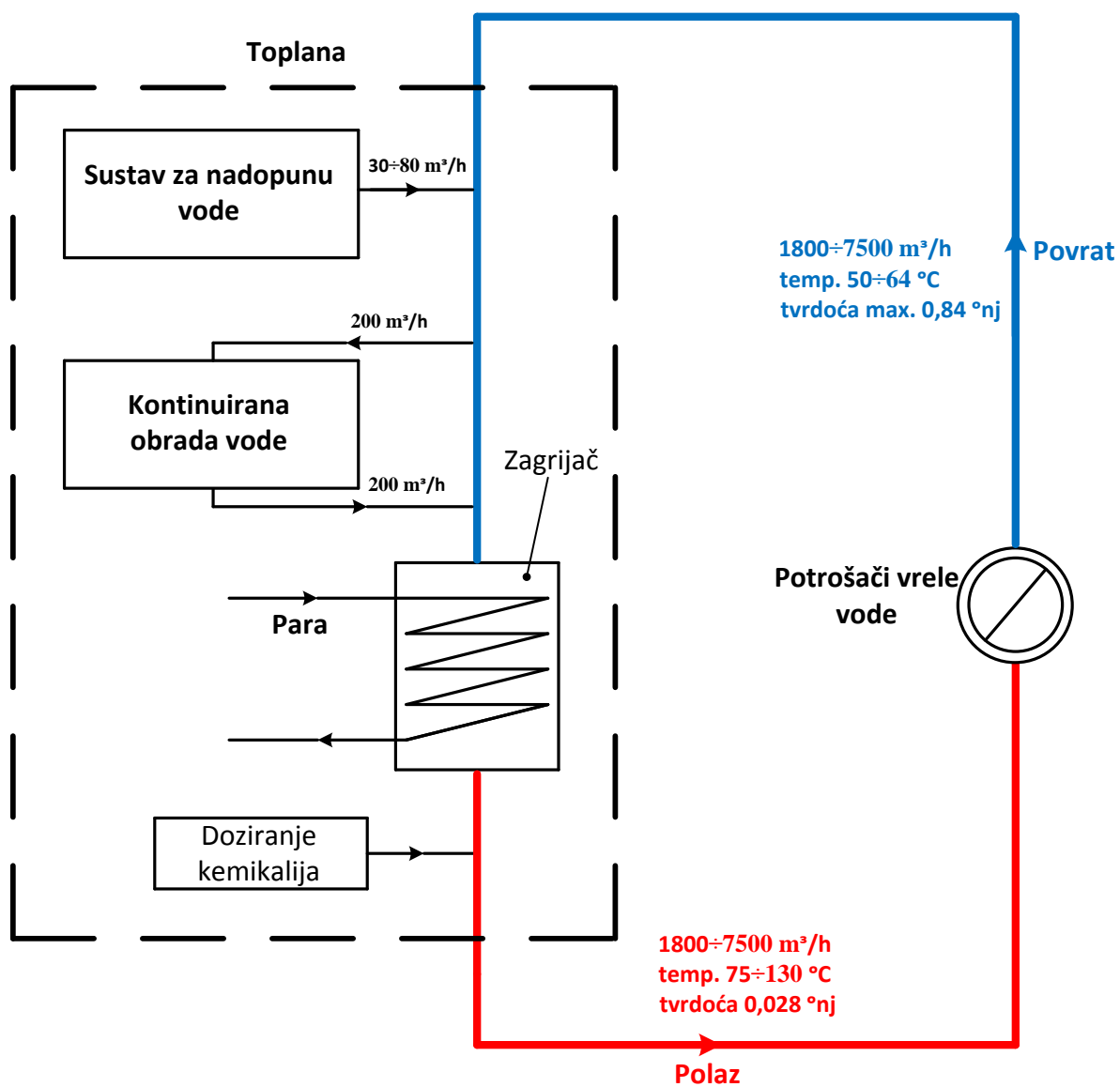
1. UVOD

Termoelektrana-Toplana Zagreb (TE-TO Zagreb) je prvi energetska objekt javnog karaktera u našoj zemlji, koji je izgrađen za kombiniranu proizvodnju toplinske i električne energije. Tisuće zagrebačkih stanova i poslovnih prostora priključenih na vrelovodnu mrežu griju se toplinom iz TE-TO Zagreb, a deseci industrijskih postrojenja koriste industrijsku paru u svojim proizvodnim procesima.

Opći podaci o TE-TO Zagreb:

- položaj: Zagreb, Žitnjak
- tip: kogeneracija električne i toplinske energije
- vrsta goriva:
 - prirodni plin
 - ekstra lako loživo ulje
 - teško loživo ulje
- ukupna snaga: 440 MWe / 850 MWt
- proizvod: električna i toplinska energija

U vrelovodnom sustavu TE-TO Zagreb (130°C) kvaliteta vode mora biti adekvatno obrađena odnosno vrši se kontinuirana obrada vode ionskim umekšavanjem. Obrada vode mora se vršiti jer se parametri kvare uglavnom prodorom sirove vode na izmjenjivačima sanitarne vode. Dio vode se u mreži gubi, pa se u sklopu vrelovodnog sustava nalazi i postrojenje za nadopunu vode. Prema smjernicama voda vrelovoda mora imati visoki pH između 9÷10 i nisku tvrdoću kako bi se spriječila korozija i taloženje kamenca na stjenkama cijevi sve u cilju poboljšanja učinkovitosti cjelokupnog postrojenja. Kamenac se stvara, jer bikarbonati kalcija i magnezija otopljeni u vodi na temperaturi okoline, doživljavaju kemijske promjene kad se voda zagrije.



Slika 1. Funkcionalna shema vrelodva

2. TEORIJSKA OSNOVA

2.1. Ionska izmjena

Ionski izmjenjivači su kruti u vodi, netopivi makromolekularni polielektroliti koji pokazuju sposobnost izmjene iona, to su ustvari, krute kiseline, baze ili soli. Dobivaju se najčešće procesima polimerizacije na bazi stirena i divinil benzena te na bazi metaakrilne kiseline. Osnovna struktura ionskog izmjenjivača sastoji se od trodimenzionalnog kostura, na kojem su fiksirani nepokretni ioni. Kako bi se sačuvala elektroneutralnost kostura s nepokretnim ionima, naboji nepokretnih iona su kompenzirani pokretnim protuionima suprotnog električnog naboja. Pokretni protuioni se zamjenjuju u procesu ionske izmjene, i ovisno o tipu upotrijebljenog izmjenjivača, proces se upotrebljava za dobivanje različitih tipova vode. Zbog zasićenja ionske mase potrebno je povremeno vršiti regeneraciju.

Ionski izmjenjivači dijele se na:

- kationske izmjenjivače i
- anionske izmjenjivače.

2.1.1. Metode regeneracije

Postoje:

- a) Istosmjerna regeneracija

Česta metoda, voda za obradbu (influent) i regenerat teku kroz sustav u istom smjeru. Općenito, voda teče od vrha prema dnu kolone i regenerat prolazi u istom smjeru. Konstrukcija kolone i rukovanje su jednostavni, cijena nije visoka. S druge strane, regenerirana smola nastoji ostati na dnu kolone i usputno utječe na kakvoću tretirane vode, a to se sprječava velikom količinom regenerata, što iziskuje veće troškove.

b) Protusmjerna regeneracija

Ulazna voda i regenerat prolaze suprotnim smjerovima. Vodi može biti dopušteno protjecanje s vrha prema dnu kolone, a regenerat prolazi od dna prema vrhu (ili obrnuto). Kod ove metode protustrujnog protoka izmjenjivač na izlazu obrađene vode skoro je kompletno regeneriran malom količinom regenerata- time je dobivena kakvoća vode daleko bolja nego u slučaju istosmjerne regeneracije.

Prednosti protustrujne regeneracije:

- potpunija ionska izmjena
- manji proboj iona
- bolje iskorištenje regenerata
- manja potrošnja vode pri ispiranju
- kod primjene u tehnologiji otpadnih voda, prednost u dobivenom jako koncentriranom eluatu
- rahljenje mase- izjednači se sastav izmjenjivača jer se kod ionske izmjene veća zrnca zbiju na dnu, a na vrhu ostanu čestice smole manjeg promjera.

2.1.2. Karakteristike ionskih izmjenjivača

Sve ionske izmjenjivače bez obzira na vrstu u koju se klasificiraju karakteriziraju neke zajedničke veličine, koje omogućuju da se ocijeni ili procijeni njihova kakvoća i uporabnost u procesima pripreme voda. Te zajedničke karakteristike su:

- veličina zrna
- stupanj umrežanja
- adsorpcija neutralnih soli
- sposobnost bubrenja
- kapacitet izmjene
- selektivnost i
- brzina izmjene iona.

Veličina zrna kreće se u praksi od $0,3\pm 0,5$ mm promjera. To su obično granule (kod polikondezacijskih smola) ili kuglice kod polimerizacijskih smola. Zrna veća od 1 mm lako se drobe.

Stupanj umrežanja - ovisi o postupku dobivanja i o njemu ovisi gustoća izmjenjivača, a time ovisi i njegova selektivnost, te bubrenje i kapacitet.

Adsorpcija neutralnih soli – je svojstvo da ionski izmjenjivač na sebe veže neutralne soli.

Bubrenje – jedno od najvažnijih svojstava a predstavlja promjenu volumena prijelazom iz jednog medija u drugi. Bubrenje omogućuje osnovno svojstvo izmjenjivača a to je njegova izmjena iona s ionima iz vode. Bubrenje kao fenomen, izazvano je djelovanjem

- visokih koncentracija iona u porama izmjenjivača koje solvativiraju i
- međusobnim elektrostatskim odbijanjem aktivnih grupa koje su istog predznaka.

Bubrenje ovisi i o prirodi protuiona te veličini njihovog ionskog naboja, zbog čega ioni s većim nabojem pokazuju veći afinitet prema izmjenjivaču.

Kapacitet izmjene – je najvažnije praktično svojstvo ionskog izmjenjivača, jer daje kvantitativni podatak o iznosu iona koje je ionski izmjenjivač sposoban izmijeniti po jedinici svoje mase ili volumena. Razlikuje se totalni ili teoretski kapacitet te korisni ili praktični kapacitet izmjene. Teoretski ili totalni odnosno ukupni kapacitet ionskog izmjenjivača predstavlja množinu iona koje može na sebe vezati nabubrena ionska masa po jedinici svoje mase ili volumena, pri čemu se ionska masa potpuno zasiti ionima iz vode, tj. da postane potpuno iscrpljen. Korisni ili praktični kapacitet izmjenjivača predstavlja količinu izmjenjivih iona po jedinici mase ili volumena izmjenjivača, koju izmjenjivač izmjenjuje do stanja pojave prve tvrdoće u pripremanoj vodi, a ona iznosi ne više od $0,1^\circ\text{nj}$. Obično se izražava u kgCaO/m^3 izmjenjivača ili u gCaO/dm^3 izmjenjivača.

Selektivnost izmjene kod ionskih izmjenjivača predstavlja svojstvo selekcije ili odabira pojedinih ionskih vrsta pri njihovoj zamjeni. Tako se razlikuje selektivnost prema ionima istog ili različitog ionskog naboja, te ionima prema veličini njihovog hidratiziranog radiusa i dr.

Brzina izmjene iona – kod ionskih izmjenjivača ovisi o koncentraciji izmjenjivih iona u vodi, njihovom radijusu i površini kao i difuziji te obliku zrna izmjenjivača.

Kod primjene ionskih izmjenjivača u pripremi voda javljaju se i druge specifične pojave kao što su

- protuionsko djelovanje i
- konkurentnost iona pri izmjeni.

Protuionsko djelovanje javlja se kod regeneracije izmjenjivača, kada se koristi premali volumen sredstva za regeneraciju visoke koncentracije. Ovo je također uzrok da se ionski izmjenjivači mogu koristiti za pripremu voda samo ako su vode, vrlo razrijeđeni vodni sustavi, i ne mogu se koristiti izravno za odsoljavanja npr. morske vode. Konkurentnost iona kod izmjene utječe na brzinu njihovog pristizanja ili dopreme u područje izmjene a ovisi o veličini naboja iona, veličini ionskog radijusa.

2.2. Membranski postupci

Membranski separacijski postupci definiraju se kao postupci koji pomoću membrane dijele ulaznu struju na dvije struje: permeat koji sadrži tvari koje prolaze kroz membranu i koncentrat koji sadrži tvari koje membrana zadržava. Permeat predstavlja struju oslobođenu od tvari prisutnih u otopini, dakle skoro čistu vodu, a koncentrat predstavlja dio ulazne struje u kojoj su te iste komponente otopine zadržane i na taj način višestruko koncentrirane. Dakle, membranski postupci mogu se npr. koristiti za pročišćavanje otopina ili suspenzija ili za njihovo koncentriranje ovisno o tome koja nam je struja interesantnija.

Membranski separacijski postupci razlikuju se prema pokretačkoj sili, gradijentu tlaka, gradijentu električnog potencijala, i gradijentu kemijskog potencijala. Tlačni membranski postupci su reverzna osmoza (RO), nanofiltracija (NF), ultrafiltracija (UF) i mikrofiltracija (MF), dok su elektrodijaliza i dijaliza rezultat gradijenta električnog, odnosno kemijskog potencijala. Osnovne razlike između navedenih postupaka su u korištenom tlaku i veličini čestica koje membrana zadržava.

Princip tlačnog membranskog postupka je da se primjenom tlaka većeg od osmotskog na otopinu, neke komponente otopine protiskuju kroz membranu. Osmotski tlak javlja se kada su dvije otopine različitih koncentracija (ili čisto otapalo i otopina) međusobno odijeljene propusnom membranom koja je propusna (permeabilna) za otapalo (vodu), ali ne i za otopljenu tvar. Kako bi voda mogla proći kroz membranu, radni tlak mora biti veći od osmotskog tlaka otopine. Ako je radni tlak manji od osmotskog tlaka ($\Delta P < \Delta \pi$), voda prolazi iz razrijeđene otopine (čista voda) prema koncentriranoj otopini jer je kemijski potencijal molekula otapala u razrijeđenoj fazi puno viši (negativniji) od potencijala u koncentriranoj fazi. Ova razlika u kemijskom potencijalu uzrokuje protok molekula otapala iz razrijeđene u koncentriranu fazu (osmoza) sve dok se ne uspostavi osmotska ravnoteža. Ako je radni tlak veći od osmotskog tlaka ($\Delta P > \Delta \pi$), voda teče od koncentrirane strane prema razrijeđenoj strani.

2.2.1. Membrana

Membrana je glavni dio membranskog uređaja i separacijski učinak bilo kojeg membranskog postupka ovisi o svojstvima i ponašanju membrane. Zato je bitna karakterizacija membrana posebno njezinog površinskog selektivnog sloja. Danas postoje mnoge metode koje služe za karakterizaciju membranske poroznosti. Pojam poroznosti membrana odnosi se na veličinu pora, veličinsku raspodjelu pora, broj, gustoću, duljinu i savijenost pora.

Tablica 1. Pregled mehanizama separacije

Membranska operacija	Pokretačka sila	Mehanizam separacije
Mikrofiltracija	ΔP	Prosijavanje
Ultrafiltracija	ΔP	Prosijavanje
Nanofiltracija	ΔP	Prosijavanje+ (otapanje/difuzija, +odbijanje)
Reverzna osmoza	ΔP	Otapanje/difuzija +odbijanje

Performansa ili učinkovitost dane membrane određena je s dva važna parametra:

- selektivnošću i
- protokom (fluksom ili brzinom permeacije).

Selektivnost membrane prema smjesi općenito se izražava pomoću parametra: stupnja zadržavanja ili retencije (separacije), R .

$$R = \frac{C - C_p}{C} = 1 - \frac{C_p}{C}$$

C - koncentracija tvari u ulaznoj vodi

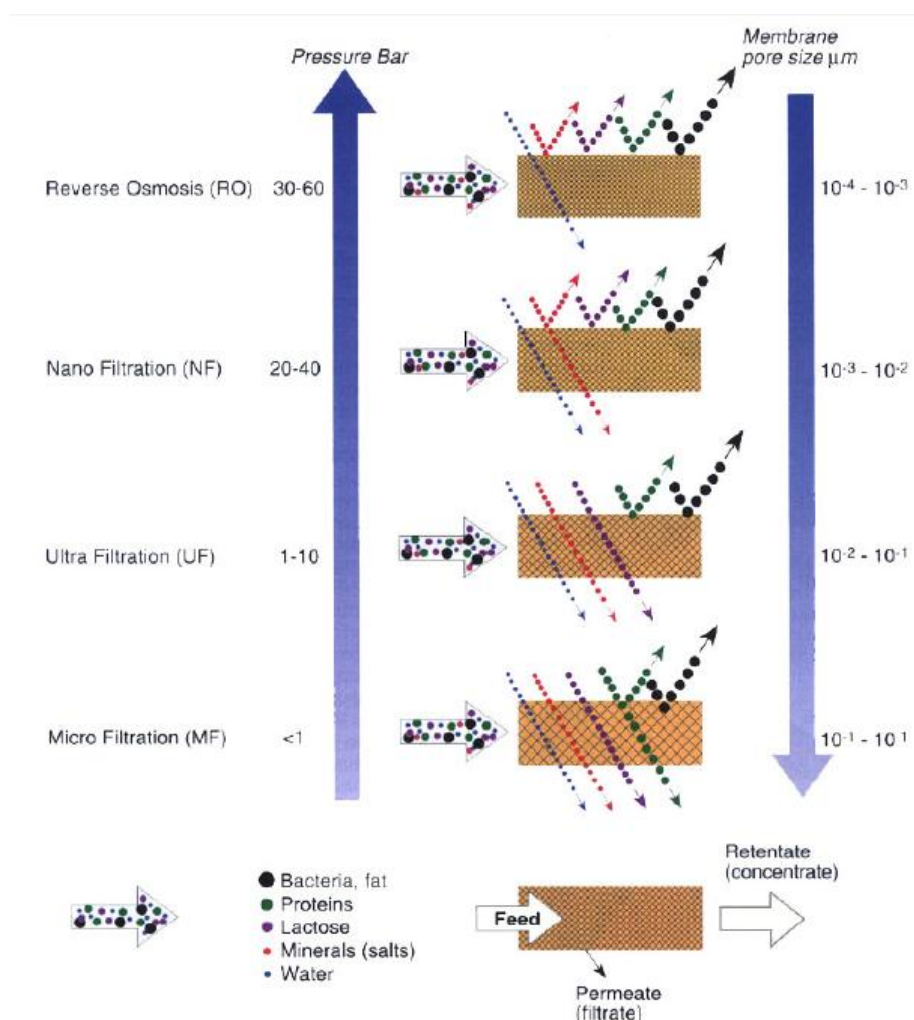
C_p - koncentracija tvari u permeatu

Membrane uz dobru selektivnost i što bolju produktivnost (permeabilnost) moraju imati:

- stabilna separacijska svojstva pri dugotrajnoj primjeni (5-8 godina),
- mehaničku, kemijsku i biološku otpornost,
- slabu podložnost taloženju koloidnih i suspendiranih tvari
- dostupnost cijenom.

Tablica 2. Područje primjene različitih membranskih postupaka

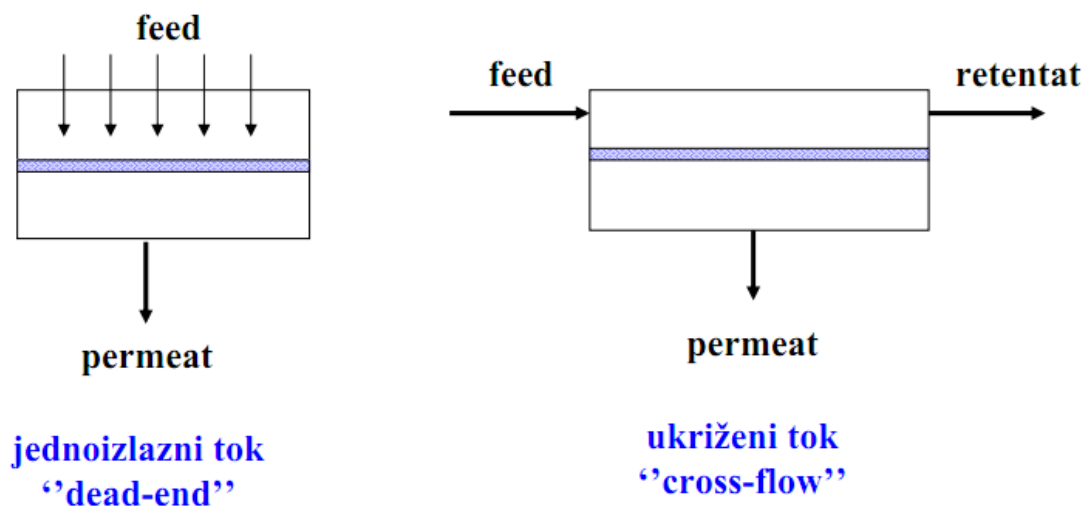
	Mikrofiltracija	Ultrafiltracija	Nanofiltracija	Reverzna osmoza
Veličina pora	> 50 nm	2 nm – 50 nm	< 2 nm	< 1 nm
Primjena	Uklanjanje bakterija, flokuliranih tvari, suspendiranih tvari	Uklanjanje koloida, proteina, virusa i bakterija, većih organskih molekula	Uklanjanje soli, stupanj separacije R: Monovalentne (NaCl) – 20-80% Polivalentne (CaSO ₄) – 90-98% Smanjenje sadržaja organskih tvari	Desalinizacija, uklanjanje svih tvari iz vode (osim plinova)
Područje flukseva	> 50 L/(m ² h bar)	10-50 L/(m ² h bar)	1,4-12 L/(m ² h bar)	0,05-1,4 L/(m ² h bar)
Transmembranski tlakovi	0,1 bar – 2 bar	1 bar – 5 bar	3,5 bar – 20 bar	10 bar – 100 bar



Slika 2. Shematski prikaz membranskih postupaka

2.2.2. Dizajn membranskih sustava

Dizajniranje membranskih sustava može se značajno razlikovati zbog velikog broja aplikacija i konfiguracija modula. Modul je centralni dio membranskog uređaja i često se imenuje separacijskom jedinicom. Broj modula (separacijskih jedinica) povezanih zajedno bilo serijski bilo paralelno čini stupanj nekog membranskog postrojenja, tzv. 'stage.' Zadaća je inženjera urediti module na takav način da se dobije optimalni dizajn uz najnižu cijenu produkta. Najjednostavniji je dizajn jednoizlazni protok ('dead-end') ili operacija gdje se sva ulazna struja; ulazni tok (feed) tjera kroz membranu što podrazumijeva da se koncentracija zadržanih komponenata u ulaznoj struji povećava te posljedično kvaliteta permeata smanjuje s vremenom. Ovaj se način još uvijek vrlo često rabi pri mikrofiltraciji.



Slika 3. Shematski prikaz dva temeljna rada modula: jednoizlazni i ukriženi tok

Za industrijsku primjenu preferira se ukriženi tok zbog manje tendencije blokiranja u odnosu na jednoizlazni način rada. Pri operacijama koje rade na ukriženom principu, ulazna struja teče paralelno s membranskom površinom. Sastav ulazne struje unutar modula mijenja se kao funkcija udaljenosti u modulu, dok se ulazna struja dijeli na dvije: struju permeata i struju retentata (koncentrata). Posljedica blokiranja u dead-end načinu rada je ta što s vremenom raste debljina kolača, a time se smanjuje fluks. Pad fluksa je relativno manji kod ukriženog protoka te se može kontrolirati i podesiti odgovarajućim izborom modula i brzine protjecanja.

TIPOVI MODULA

1. Modul na principu filter preše
2. Modul u obliku spiralnog namotaja
3. Cijevni modul
4. Modul sastavljen od šupljih vlakana

Konstrukcijom modula nastoji se:

- što bolje iskoristiti aktivna membranska površina,
- postići da ta površina bude što veća u relativno malom volumenu (visoka gustoća slaganja membrana)

- istovremeno postići što veću turbulenciju, dobre hidrauličke uvjete potrebne za smanjenje koncentracijske polarizacije (koncentriranje otopljenih tvari na tlačnoj strani membrane) i smanjenje stvaranja taloga,
- omogućiti lako čišćenje membrana,
- postići da pad tlaka u modulu ne bude previsok,
- da za rad modula nije potrebna ekstenzivna predobradba vode, te da je cijena modula razumna.

Svaki od modula ima svoje prednosti i nedostatke, a u praksi se najviše rabe moduli u obliku spiralnog namotaja i modul sa šupljim vlaknima.

2.2.3. Reverzna osmoza

Princip reverzne osmoze je obrnuti principu osmoze u prirodi. Sirova voda koju je potrebno odsoliti dolazi pod visokim pritiskom u posudu sa polupropusnom membranom. Membrana propušta samo čistu vodu i ne propušta ione otopljenih tvari koji ostaju skupljeni na membrani. Dio vode tako postane čista odsoljena voda (permeat) a u ostatku vode se pojača koncentracija soli (koncentrat).

Reverzno osmotske membrane u obliku tankih šupljih vlakana pokazuju dobra separacijska svojstva, ali relativno niske protoke, što se onda kompenzira mogućnošću da se u mali volumen smjesti snop od mnogo vlakana. Na taj se način dobije veoma velika membranska površina, što je i glavna prednost ovih membrana. Veliki nedostatak membrana u ovom obliku je lako onečišćenje, odnosno začepljenje aktivne površine.

Tehnika reverzne osmoze je započeta s osnovnim ciljem da se pomoću ovog procesa vrši desalinizacija morske i drugih slanih voda. U novije vrijeme upotreba ovog procesa proširena je na separaciju niza organskih i anorganskih tvari iz vode, posebno za pročišćavanje otpadnih voda, na koncentriranje pojedinih tvari iz vodene otopine (lijekovi, voćni sokovi) i na frakcioniranje pojedinih otopljenih tvari jednih od drugih, ili na bazi razlika u molekularnim težinama (monomeri od polimera) ili na bazi različitih fizikalno-kemijskih karakteristika (soli od organskih molekula). Najnoviji razvoj ide u pravcu primjene reverzne osmoze za prije navedene operacije od nevedenih otopina.

2.2.4. Nanofiltracija

Princip nanofiltracije je isti kao kod reverzne osmoze. Uređaji za nanofiltraciju se često koriste kao alternativa za klasično omekšivanje vode između ostalog i zato što troškovi nanofiltracije su niži zato što nema potrebe za regeneracijom omekšivača velikim količinama soli. Koristi se za uklanjanje dvovalentnih iona (Fe^{++} , Ca, Mg) iz vode. Glavna namjena je čišćenje vode u sustavima grijanja vode, čišćenje bojlera, proizvodnja hrane i pića, obrada vode i aplikacije u visokokapacitetnim rashladnim tornjevima.

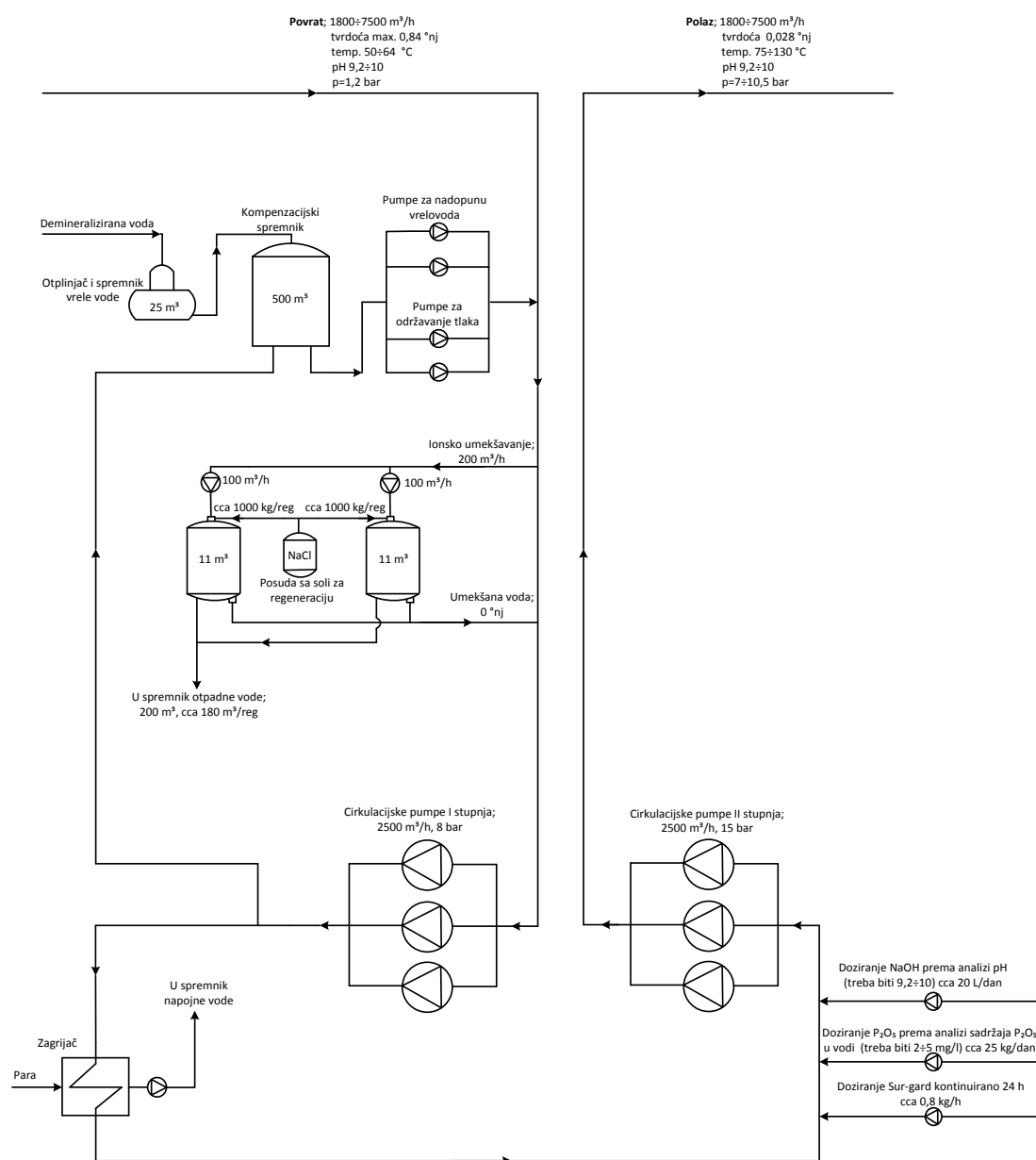
Nanofiltracijske membrane slične su reverzno osmotskim samo je njihova struktura otvorenija i negativno su nabijene. To implicira slabije zadržavanje monovalentnih iona, ali je retencija dvovalentnih iona vrlo visoka. Također je vrlo veliko zadržavanje mikropolutanata i mikrootopljenih tvari kao što su herbicidi, insekticidi, pesticidi te ostale niskomolekulne tvari kao što su boje i šećeri. Nanofiltracijske i reverzno osmotske membrane nalaze se između otvorenih poroznih membrana (MF i UF) i gustih neporoznih membrana (pervaporacija) (vidi Slika 2.). Zbog njihove velike otpornosti moraju se koristiti značajno veći tlakovi da bi određena količina otapala prošla kroz membranu.

Tablica 3. Usporedba koeficijenata zadržavanja između nanofiltracije i reverzne osmoze

Otopljena tvar	RO	NF
Monovalentni ioni (Na, K, CL, NO_3)	> 98%	< 50%
Divalentni ioni (Ca, Mg, SO_4, CO_3)	> 99%	> 90%
Bakterije i virusi	> 99%	< 99%
Mikrootopljene tvari (MW>100)	> 90%	> 50%
Mikrootopljene tvari (MW<100)	0-99 %	0-50%

3. OPIS POSTOJEĆEG STANJA U TE-TO ZAGREB

Vrelvodni sustav TE-TO Zagreb kapaciteta je cca 15000 m³ te kroz dva polazna i dva povratna vrelvoda ukupnog kapaciteta 500 MWt, pomoću cirkulacijskih pumpi prvog i drugog stupnja omogućava opskrbu toplom vodom središnjeg i južnog dijela grada. Parom iz blokova A, C, K griju se vrelvodni izmjenjivači topline a vrelvodni predizmjenjivači kotlova utilizatora 1 i 2 koriste toplinu dimnih plinova plinskih turbina.



Slika 4. Pojednostavljena shema vrelvodnog sustava TE-TO Zagreb

Toplinska snaga sustava ovisi o potrošnji. Pa tako ljeti dok nema potrebe za grijanjem protok može pasti na 1800 m³/h, tlak polaza na 7 bar; tlak povrata se održava konstantnim na cca 1,15 bar, temperatura polaza na 75 °C, a temperatura povrata na 50 °C. Zimi protok može biti 7400 m³/h, tlak polaza 10,5 bar, temperatura polaza 130 °C; a povrata 64 °C.

Tablica 4. Obavezni parametri

Vanjska T (°C)	Dnevni režim rada; 05-23 h					Sunčano bez vjetra; 08-15 h	Noćni režim rada; 23-05 h
	T _{polaz} (°C)	T _{povrat} (°C)	ΔT (°C)	Protok (m ³ /h)	Toplinska snaga (MW)	T _{polaz} (°C)	T _{polaz} (°C)
12	75	50	25	4450	129	70	65
11	77	51	26	4719	146	70	66
10	79	51	28	4959	162	70	68
9	81	52	29	5175	178	71	69
8	83	52	31	5370	194	73	70
7	85	53	32	5546	210	75	71
6	87	53	34	5707	226	77	73
5	89	54	35	5854	243	79	74
4	91	54	37	5989	259	81	75
3	93	55	38	6113	275	83	77
2	95	55	40	6228	291	85	78
1	97	56	41	6335	307	87	79
0	99	56	43	6434	323	89	81
-1	101	57	44	6527	340	91	82
-2	104	57	47	6613	356	94	83
-3	106	58	48	6694	372	96	84
-4	108	58	50	6770	388	98	86
-5	110	59	51	6841	404	100	87
-6	112	59	53	6908	420	102	88
-7	114	60	54	6972	437	104	90
-8	116	60	56	7032	453	106	91
-9	118	61	57	7088	469	108	92
-10	120	61	59	7142	485	110	94
-11	122	62	60	7193	501	112	95
-12	124	62	62	7242	517	114	96
-13	126	63	63	7288	534	116	97
-14	128	63	65	7332	550	118	99
-15	130	64	66	7374	566	120	100

Tvrdoća vode na polazu je zadovoljavajuća ($0,028^{\circ}\text{nj}$), problem predstavlja tvrdoća vode u povratu (cca 1°nj), dok se pH vrijednost značajno ne mijenja. Parametri vode vrelovoda kvare se uglavnom prodorom sirove vode na izmjenjivačima vode u toplinskim stanicama na vrelovodnoj mreži.

U okviru toplinske stanice nalazi se sustav nadopune vode za pokrivanje gubitaka vrelovodne mreže i sustav za održavanje tlaka u vrelovodnoj mreži.

Tablica 5. Gubici vode u mreži

Mjesec	Količina (m^3)
1	30044
2	31266
3	29766
4	27464
5	25825
6	19567
7	31584
8	31983
9	28717
10	32338
11	29644
12	35777
Ukupno na godinu	353975

Nadopuna sustava se vrši otplinjenom demineraliziranom vodom i čistim kondenzatima kontinuirano tako da se regulira tlak od 1,15 bar. Kvaliteta demi vode mjeri se u procesu proizvodnje (Tablica 6.).

Tablica 6. Kvaliteta demi vode

UT (mval/l)	p-alk (mval/l)	m-alk (mval/l)	pH	Vodljivost ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	$\text{O}_2(\text{pp})$	$\text{SiO}_2(\text{ppb})$
0	0	0,04	7 do 8	0,04	0	0

Dio vode iz povrata (200 m³/h) uzima se i vodi na neutralne ionske izmjenjivače na umekšavanje (Slika 4.). Oba izmjenjivača rade zajedno cca dva mjeseca odnosno cca 30 dana rad bez ikakvog prekida, a regeneracija se vrši kada se iza njih pojavi ukupna tvrdoća veća od nule ili kada dođe do zaprljanja sapnica izmjenjivača što se vidi po porastu razlike tlaka. Regeneracija traje cca 24 h a potroši se cca 1000 kg soli NaCl po jednom izmjenjivaču. Otpadna voda od regeneracije vodi se u spremnik otpadne vode koji je kapaciteta 200 m³.

Umekšana voda zatim se vraća povratu, odvodi na cirkulacijske pumpe I stupnja, zagrije parom i eventualno kemijski poboljša prije cirkulacijskih pumpi drugog stupnja. Kemikalije koje se dodaju su (Slika 4.):

- Sur-gard za uklanjanje kisika,
- P₂O₅ za sprečavanje nastajanja kamenca,
- NaOH za regulaciju pH.

Nakon doziranja kemikalija voda se podiže pomoću cirkulacijskih pumpi na viši tlak i distribuira potrošačima.

Tablica 7. Voda vrelovodnog sustava prema VGB smjernicama (VGB-M410N.1994)

Karakteristike kakvoće	Jedinica	Preporučena vrijednost parametara	Normalna pogonska vrijednost parametara
Električna vodljivost kod 25°C	μS/cm	<100	< 30
Električna vodljivost iza kat. izmj. kod 25°C	μS/cm	-	< 10
pH vrijednost kod 25°C	-	9 do 10	9,5 do 10
Kisik (O ₂)	mg/l	< 0,02	< 0,001
Klorid (Cl)	mg/l	-	< 1
Ukupno željezo (Fe)	mg/l	-	< 0,03

4. TEHNOLOGIJE ZA NADOPUNU VODE

Kod tehnologija za nadopunu vode razmotrit će se tri slučaja:

- demineralizacija u dva stupnja sa otplinjivačem CO₂,
- reverzna osmoza,
- nanofiltracija.

Za sva tri slučaja upotrijebit će se potrebni parametri Zagrebačke vode (Tablica 8.). TE-TO ovu vodu ima na raspolaganju putem tri bunara.

Tablica 8. Kvaliteta Zagrebačke vode

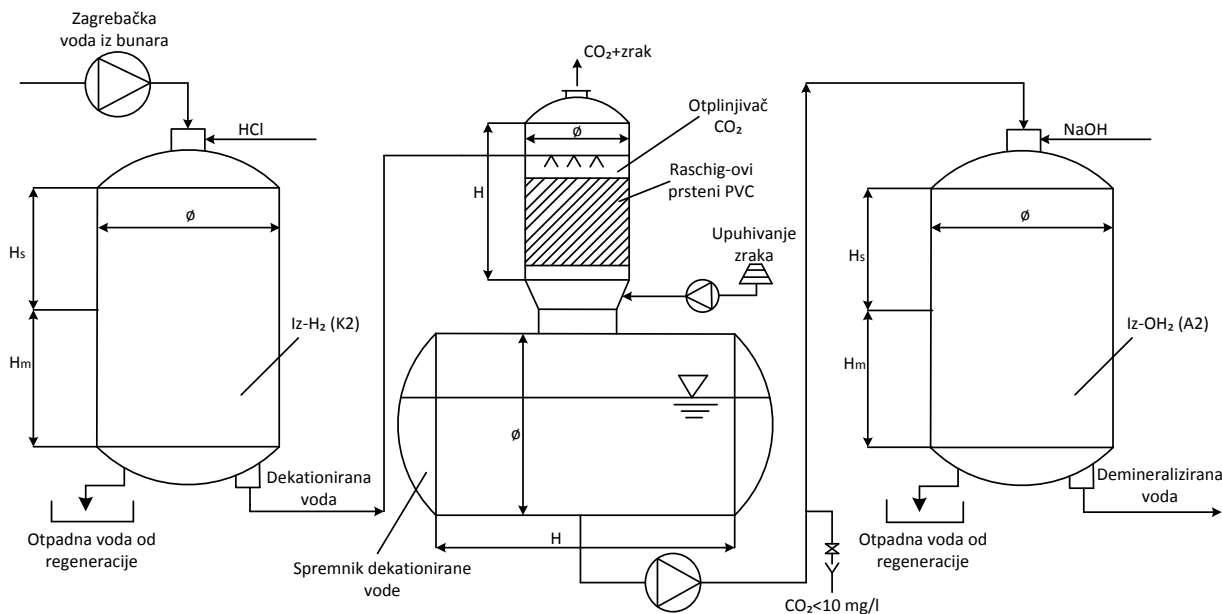
Izgled	potpuno bistra
Temperatura (°C)	14,8
Vodljivost (μS/cm)	381
pH - vrijednost	7,5
"p" - alkalitet (mval/l)	0
"m" - alkalitet (mval/l)	3,8
"-m" - alkalitet (mval/l)	0,9
Ukupna tvrdoća (mval/l)	4,2
Kalcijeva tvrdoća (mval/l)	3
Kloridi (mg/l)	7,5
Sulfati (mg/l)	29,5
Nitrati (mg/l)	2,5
Nitriti (mg/l)	0,055
Silicij, SiO ₂ (mg/l)	4,34
Potrošak KMnO ₄ (mg/l)	2,528
Željezo (mg/l)	0,04
Fosfati kao P ₂ O ₅ (mg/l)	0,784
Natrij (mg/l)	11,5

Potrebni prosječni protok Zagrebačke vode dobi se tako da se ukupni gubici vode u mreži u jednoj godini podijele sa brojem sati u godini;

$$\frac{353975 \text{ m}^3}{8760 \text{ h}} = 40,4 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Zbog mogućnosti većeg propuštanja u proračunima će se uzet protok od $Q = 100 \text{ m}^3/\text{h}$.

4.1. Demineralizacija u dva stupnja opremljena otplinjivačem CO₂ sa istostrujnom regeneracijom

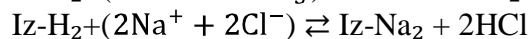
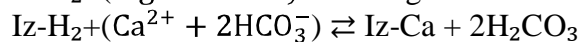
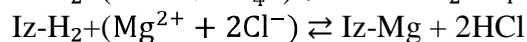
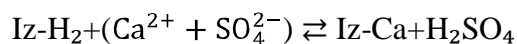


Slika 5. Shema linije za demineralizaciju

Bunarska (Zagrebačka) voda doprema se iz bunara pumpom u postrojenje za demineralizaciju. Demineralizacija vode, tj. proces uklanjanja rastvorenih soli iz vode, vrši se u jako kiseom kationskom (K2) i jako baznom anionskom izmjenjivaču (A2) s ionskom masom u lebdećem sloju. U kationskom filteru se kationi Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} izmjenjuju sa H^+ ionima ionske mase. Voda koja izlazi iz filtera sadrži slobodne mineralne kiseline. U otplinjivaču CO₂ mješa se voda u protustruji sa zrakom koji se dovodi pomoću posebnog ventilatora, uslijed čega dolazi do otplinjavanja ugljične kiseline. Pomoću pumpe za dekantiranu vodu odvođa se voda oslobođena CO₂ do anionskog filtra. U anionskom filtru izmjenjuju se anioni Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , HSiO_3^- s OH^- ionima ionskih masa. Voda koja izlazi je praktički bez soli i neutralna.

4.1.1. Jako kisela kationska izmjena - (K2)

Jednadžbe izmjene:



Svi kationi u vodi izmjene se s H^+ ionima smole te se dobije kisela voda $\text{pH}=2,8\div 3$ (dekationirana voda) oslobođena od metalnih iona koja se ne može upotrijebiti kao procesna voda te se mora obraditi sa smolom anionske skupine.

4.1.1.1. Proračun potrošnje kemikalija

Kemikalija koja se upotrebljava kod jako kisele kationske izmjene je HCl , a služi za regeneraciju mase kada dođe do zasićenja. Praktična regeneracija obavlja se 1,05 do 1,1 puta većom količinom od teoretske, ovdje je uzeto 1,05.

$$BT = ("m" \text{ alkalitet}) + AT_1 \quad \text{mval/l} \quad - \quad \text{bazna tvrdoća}$$

$$"m" \text{ alkalitet} = 3,8 \quad \text{mval/l} \quad - \quad \text{karbonatna tvrdoća}$$

$$AT_1 = "-m" \text{ alkalitet} \quad \text{mval/l} \quad - \quad \text{anionska tvrdoća jedan}$$

$$AT_1 = 0,9 \quad \text{mval/l}$$

$$BT = 3,8 + 0,9 = 4,7 \quad \text{mval/l}$$

$$\tau = 16 \quad \text{h} \quad - \quad \text{vrijeme rada filtera između dvije regeneracije}$$

$$Q = 100 \quad \text{m}^3/\text{h} \quad - \quad \text{protočna volumna brzina vode}$$

$$\text{HCl } 100\% = BT \cdot Q \cdot \tau \cdot 1,05 \quad \text{val/reg}$$

$$\text{HCl } 100\% = 4,7 \cdot 100 \cdot 16 \cdot 1,05 = 7896 \quad \text{val/reg}$$

$$E_t = \frac{M}{v} \quad \text{mg/mval} \quad - \quad \text{ekvivalentna težina kemijskog spoja}$$

$$M = 36,46 \quad \text{mg/mmol} \quad - \quad \text{molarna masa}$$

$$v = 1 \quad - \quad \text{valencija atoma}$$

$$E_t = 36,46 \quad \text{g/val}$$

$$\text{HCl } 100\% = 7896 \cdot 36,46 \cdot 10^{-3} = 287,88 \quad \text{kg/reg}$$

$$\begin{aligned} HCl \ 30\% &= HCl(100\%)/0,3 && \text{kg/reg} \\ HCl \ 30\% &= 287,88/0,3 = 959,62 && \text{kg/reg} \end{aligned}$$

$$HCl \ 30\%_{lit} = \frac{HCl \ 30\%}{\rho} \quad \text{l/reg} \quad - \quad (\text{za } \vartheta = 20 \text{ } ^\circ\text{C}; \rho \ HCl_{30\%} = 1,149 \text{ g/cm}^3)$$

$$HCl \ 30\%_{lit} = 959,62/1,149 = 835,2 \quad \text{l/reg}$$

4.1.1.2. Proračun posude za regeneraciju

$$V_p = 1,2 \cdot HCl(30\%)_{lit} \quad \text{l}$$

$$V_p = 1,2 \cdot 835,2 = 1002,3 \quad \text{l}$$

$$\text{usvaja se: } V_p = 1005 \text{ l}$$

Dimenzije posude

$$H_p = 1500 \quad \text{mm} \quad - \quad \text{odabrana visina posude}$$

$$F_p = \frac{V_p}{H_p} \quad \text{m}^2 \quad - \quad \text{površina poprečnog kružnog presjeka}$$

$$F_p = \frac{1,005}{1,5} = 0,67 \quad \text{m}^2$$

$$\varnothing d = \sqrt{\frac{F_p \cdot 4}{\pi}} \quad \text{m} \quad - \quad \text{promjer kruga poprečnog presjeka}$$

$$\varnothing d = \sqrt{\frac{0,67 \cdot 4}{\pi}} = 0,924 \quad \text{m}$$

$$\text{usvaja se: } \varnothing d = 950 \text{ mm}$$

Debljina stijenke plašta je

$$s = \frac{d \cdot p}{20 \cdot \frac{K}{S} \cdot \nu + p} + c_1 + c_2 \quad \text{mm}$$

$$p = 6 \quad \text{bar} \quad - \quad \text{proračunski tlak}$$

$$d = 950 \quad \text{mm} \quad - \quad \text{usvojeni promjer filtra}$$

$$S = 1,5 \quad - \quad \text{stupanj sigurnosti za valjani i kovani čelik}$$

$$\nu = 1 \quad - \quad \text{koeficijent oslabljenja za tlačne posude}$$

$K = 200,5$	N/mm ²	-	proračunska čvrstoća na radnoj temp. (za Č.0361 kod 40 °C)
$c_1 = 0,5$	mm	-	dodatak za dopušteno odstupanje materijala za debeli lim
$c_2 = 1$	mm	-	dodatak za smanjenje debljine lima korozijom i trošenjem za feritne čelike

$$s = \frac{1200 \cdot 6}{20 \cdot \frac{200,5}{1,5} \cdot 1 + 6} + 0,5 + 1 = 3,627 \text{ mm}$$

usvaja se: $s = 4 \text{ mm}$

Dimenzije posude za HCl(30%) iznose: Ø950 mm x 1500 mm x 4 mm

4.1.1.3. Proračun veličina filtra

$K_k = 1,25$	val/l	-	korisni volumni kapacitet ionskog izmjenjivača
--------------	-------	---	--

$$V_m = \frac{Q \cdot BT \cdot \tau}{K_k} \quad \text{l} \quad - \quad \text{volumen ionske mase}$$

$$V_m = \frac{100 \cdot 4,7 \cdot 16}{1,25} = 6016 \text{ l} = 6,016 \text{ m}^3$$

usvaja se: $V_m = 6020 \text{ l}$

$$S_p = \frac{Q}{V_m} \quad (\text{m}^3/\text{h vode})/(\text{m}^3 \text{ mase}) \quad - \quad \text{specifično volumno opterećenje ionskog filtra}$$

$$S_p = \frac{100}{6,02} = 16,61 \quad (\text{m}^3/\text{h vode})/(\text{m}^3 \text{ mase})$$

$$c_p = 25 \quad \text{m/h} \quad - \quad \text{protočna brzina vode (10÷50)}$$

$$F = \frac{Q}{c_p} \quad \text{m}^2 \quad - \quad \text{površina poprečnog kružnog presjeka ionskog filtra}$$

$$F = \frac{100}{25} = 4 \quad \text{m}^2$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi}} \quad \text{m} \quad - \quad \text{promjer kruga poprečnog presjeka kolone ionskog filtra}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 4}{\pi}} = 2,256 \text{ m}$$

usvaja se: $\varnothing d = 2300 \text{ mm}$

$$H_m = \frac{V_m}{F} \quad \text{m} \quad - \quad \text{visina stupca ionske mase}$$

$$H_m = \frac{6,02}{4} = 1,505 \quad \text{m}$$

$$H_s = H_m + 0,1 \cdot H_m \quad \text{m} \quad - \quad \text{visina slobodnog prostora}$$

$$H_s = 1,505 + 0,1 \cdot 1,505 = 1,655 \quad \text{m}$$

$$H = 2,1 \cdot H_m \quad \text{m} \quad - \quad \text{visina kolone ionskog filtra}$$

$$H = 2,1 \cdot 1,505 = 3,16 \quad \text{m}$$

usvaja se: $H = 3200 \text{ mm}$

Debljina stijenke plašta je

$$s = \frac{d \cdot p}{20 \cdot \frac{K}{S} \cdot \nu + p} + c_1 + c_2 \quad \text{mm}$$

$$p = 6 \quad \text{bar} \quad - \quad \text{proračunski tlak}$$

$$d = 2300 \quad \text{mm} \quad - \quad \text{usvojeni promjer filtra}$$

$$S = 1,5 \quad - \quad \text{stupanj sigurnosti za valjani i kovani čelik}$$

$$\nu = 1 \quad - \quad \text{koeficijent oslabljenja za tlačne posude}$$

$$K = 200,5 \quad \text{N/mm}^2 \quad - \quad \text{proračunska čvrstoća na radnoj temp. (za Č.0361 kod 40 °C)}$$

$$c_1 = 0,5 \quad \text{mm} \quad - \quad \text{dodatak za dopušteno odstupanje materijala za debeli lim}$$

$$c_2 = 1 \quad \text{mm} \quad - \quad \text{dodatak za smanjenje debljine lima korozijom i trošenjem za feritne čelike}$$

$$s = \frac{2300 \cdot 6}{20 \cdot \frac{200,5}{1,5} \cdot 1 + 6} + 0,5 + 1 = 6,65 \quad \text{mm}$$

usvaja se: $s = 7 \text{ mm}$

Dimenzije jako kiselog kationskog filtra iznose: $\varnothing 2300 \text{ mm} \times 3200 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$

4.1.2. Otplinjivač CO_2

Otplinjivač CO_2 služi za smanjenje sadržaja CO_2 u dekarboniranoj vodi. Ulazna koncentracija CO_2 je ovisna o karbonatnoj tvrdoći sirove vode, a izlazna je manja od 10 mg/l. Ispunu otplinjivača čine Raschigovi prsteni (odsječci cijevi, promjera jednakog dužini, u rasponu od 25 mm do 50 mm) u sloju debljine od 1200 mm do 2000 mm. S obzirom na to da je nakon uklanjanja svih kationa iz vode (dekarbonirana voda) pH vrijednost vode povoljna za uklanjanje CO_2 jer je sav otopljeni CO_2 u vodi prisutan kao plin. Otplinjavanjem ugljičnog

dioksida smanjuje se njegova koncentracija u vodi te se bitno rasterećuje anionski stupanj u nastavku demineralizacije. Sav preostali CO_2 nužno se uklanja na jako baznoj anionskoj masi (uglavnom kao HCO_3^-).

Stoga se primjenom otplinjivača CO_2 u okviru sustava za demineralizaciju postiže:

- smanjenje potrebne količine jako bazne mase (ujedno manje dimenzije filtra),
- smanjenje potrebne količine NaOH za regeneraciju anionskog stupnja.

Stupanj ovih smanjenja izravno je povezan sa sadržajem karbonatne tvrdoće sirove vode. Što je veći sadržaj karbonatne tvrdoće, veće su i uštede, odnosno važnost primjene otplinjivača CO_2 .

4.1.2.1. Proračun potrošnje kemikalija

Nema potrošnje kemikalija u otplinjivaču.

4.1.2.2. Proračun veličina uređaja

$Q = 100$	m^3/h	-	protočna volumna brzina vode
$c_p = 40$	m/h	-	brzina strujanja vode kroz otplinjač (30÷50)
$H_{pr} = 2000$	mm	-	visina punjenja Raschigovim prstenovima
$H_s = 1000$	mm	-	visina slobodnog prostora

$$F = \frac{Q}{c_p} \quad \text{m}^2 \quad - \quad \text{površina poprečnog kružnog presjeka otplinjivača}$$

$$F = \frac{100}{40} = 2,5 \quad \text{m}^2$$

$$d = \frac{\sqrt{4 \cdot F}}{\pi} \quad \text{m} \quad - \quad \text{promjer kruga poprečnog presjeka otplinjivača}$$

$$d = \frac{\sqrt{4 \cdot 2,5}}{\pi} = 1,784 \quad \text{m}$$

usvaja se: $\varnothing d = 1800 \text{ mm}$

Debljina stjenke plašta je

$$s = \frac{d \cdot p}{20 \cdot \frac{K}{S} \cdot \nu + p} + c_1 + c_2 \quad \text{mm}$$

$p = 6$	bar	-	proračunski tlak
$d = 1800$	mm	-	usvojeni promjer filtra
$S = 1,5$		-	stupanj sigurnosti za valjani i kovani čelik
$\nu = 1$		-	koeficijent oslabljenja za tlačne posude
$K = 200,5$	N/mm ²	-	proračunska čvrstoća na radnoj temp. (za Č.0361 kod 40 °C)
$c_1 = 0,5$	mm	-	dodatak za dopušteno odstupanje materijala za debeli lim
$c_2 = 1$	mm	-	dodatak za smanjenje debljine lima korozijom i trošenjem za feritne čelike

$$s = \frac{1800 \cdot 6}{20 \cdot \frac{200,5}{1,5} \cdot 1 + 6} + 0,5 + 1 = 5,53 \quad \text{mm}$$

usvaja se: $s = 6 \text{ mm}$

Dimenzije otplinjivača iznose: $\varnothing 1800 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$

$v_z = 50$	m ³ zraka/m ³ vode	-	brzina strujanja zraka
$V_z = v_z \cdot Q$	m ³ zraka/h	-	potrebna količina zraka
$V_z = 50 \cdot 100 = 5000$	m ³ zraka/h		
$\Delta p = 2500$	Pa		

Napomena: prolaskom vode kroz otplinjivač pH-vrijednost se slabo mijenja (približno za 0,2÷0,3).

4.1.3. Spremnik dekaionirane vode

4.1.3.1. Proračun potrošnje kemikalija

Nema potrošnje kemikalija u spremniku dekaionirane vode.

4.1.3.2. Proračun veličina uređaja

$\tau = 0,2$	h	-	vrijeme retencije
$V = 0,2 \cdot Q$	m ³	-	volumen spremnika dekaionirane vode
$V = 0,2 \cdot 100 = 20$	m ³		

$$c_p = 20 \quad \text{m/h} \quad - \quad \text{brzina strujanja vode}$$

$$F = \frac{Q}{c_p} \quad \text{m}^2 \quad - \quad \text{površina poprečnog kružnog presjeka ionskog filtra}$$

$$F = \frac{100}{20} = 5 \quad \text{m}^2$$

$$d = \frac{\sqrt{4 \cdot F}}{\pi} \quad \text{m} \quad - \quad \text{promjer kruga poprečnog presjeka spremnika}$$

$$d = \frac{\sqrt{4 \cdot 5}}{\pi} = 2,523 \quad \text{m}$$

usvaja se: $\varnothing d = 2600 \text{ mm}$

$$H = \frac{V}{F} \quad \text{m} \quad - \quad \text{visina spremnika}$$

$$H = \frac{20}{5} = 4 \quad \text{m}$$

usvaja se: $H = 4000 \text{ mm}$

Debljina stijenke plašta je

$$s = \frac{d \cdot p}{20 \cdot \frac{K}{S} \cdot v + p} + c_1 + c_2 \quad \text{mm}$$

$$p = 6 \quad \text{bar} \quad - \quad \text{proračunski tlak}$$

$$d = 2600 \quad \text{mm} \quad - \quad \text{usvojeni promjer filtra}$$

$$S = 1,5 \quad - \quad \text{stupanj sigurnosti za valjani i kovani čelik}$$

$$v = 1 \quad - \quad \text{koeficijent oslabljenja za tlačne posude}$$

$$K = 200,5 \quad \text{N/mm}^2 \quad - \quad \text{proračunska čvrstoća na radnoj temp. (za Č.0361 kod 40 °C)}$$

$$c_1 = 0,5 \quad \text{mm} \quad - \quad \text{dodatak za dopušteno odstupanje materijala za debeli lim}$$

$$c_2 = 1 \quad \text{mm} \quad - \quad \text{dodatak za smanjenje debljine lima korozijom i trošenjem za feritne čelike}$$

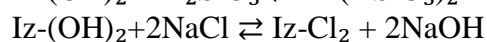
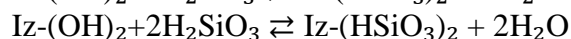
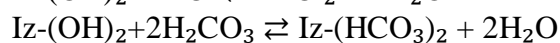
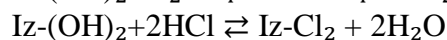
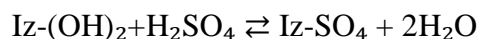
$$s = \frac{2600 \cdot 6}{20 \cdot \frac{200,5}{1,5} \cdot 1 + 6} + 0,5 + 1 = 8,22 \quad \text{mm}$$

usvaja se: $s = 7,32 \text{ mm}$

Dimenzije otplinjivača iznose: $\varnothing 2600 \text{ mm} \times 4000 \text{ mm} \times 7,5 \text{ mm}$

4.1.4. Jako bazna anionska izmjena - (A2)

Jednadžbe izmjene:



Nakon jako kiselog kationskog izmjenjivača i otplinjivača umekšana voda protiče kroz jako bazični anionski izmjenjivač koji veže ostatak ugljične kiseline i svu keramičnu kiselinu. Izlazna voda je demineralizirana (vodljivost $< 5 \mu\text{S/cm}$) te se takvom nadopunjuje vrelovodni sustav.

4.1.4.1. Proračun potrošnje kemikalija

Kemikalija koja se upotrebljava kod jako kisele kationske izmjene je NaOH, a služi za regeneraciju mase kada dođe do zasićenja. Praktična regeneracija obavlja se 1,5 puta većom količinom od teoretske.

$$AT = AT_1 + AT_2 \quad \text{mval/l} \quad - \quad \text{ukupna anionska tvrdoća}$$

$$AT_1 = \text{"-m" alkalitet} \quad \text{mval/l} \quad - \quad \text{anionska tvrdoća jedan}$$

$$AT_1 = 0,9 \quad \text{mval/l}$$

$$AT_2 = \text{sadržaj } \text{CO}_2 + \text{SiO}_2 \quad \text{mval/l} \quad - \quad \text{anionska tvrdoća dva}$$

Sadržaj ugljičnog dioksida nakon prolaska kroz otplinjivač CO_2 iznosi približno 10 mg/l, stoga tvrdoća ugljične kiseline iznosi:

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{mg/l } \text{CO}_2}{44,01 \text{ mg/mval}} \quad \text{mval/l} \quad - \quad \text{tvrdoća ugljične kiseline}$$

$$\text{CO}_2 = \frac{10}{44,01} = 0,227 \quad \text{mval/l}$$

$$\text{SiO}_2 = \frac{\text{mg/l } \text{SiO}_2}{60,08 \text{ mg/mval}} \quad \text{mval/l} \quad - \quad \text{tvrdoća SiO}_2$$

$$SiO_2 = \frac{4,34}{60,08} = 0,072 \quad \text{mval/l}$$

$$AT_2 = 0,2272 + 0,07223 = 0,299 \quad \text{mval/l}$$

$$AT = 0,9 + 0,2994 = 1,2 \quad \text{mval/l}$$

$$\tau = 16 \quad \text{h} \quad - \quad \text{vrijeme rada filtera između dvije regeneracije}$$

$$Q = 100 \quad \text{m}^3/\text{h} \quad - \quad \text{protočna volumna brzina vode}$$

$$NaOH \text{ } 100\% = AT \cdot Q \cdot \tau \cdot 1,5 \quad \text{val/reg}$$

$$NaOH \text{ } 100\% = 1,2 \cdot 100 \cdot 16 \cdot 1,5 = 2880 \quad \text{val/reg}$$

$$E_t = \frac{M}{v} \quad \text{mg/mval} \quad - \quad \text{ekvivalentna težina kemijskog spoja}$$

$$M = 40 \quad \text{mg/mmol} \quad - \quad \text{molarna masa}$$

$$v = 1 \quad - \quad \text{valencija atoma}$$

$$E_t = 40 \quad \text{g/val}$$

$$NaOH \text{ } 100\% = 2880 \cdot 40 \cdot 10^{-3} = 115,2 \quad \text{kg/reg}$$

$$NaOH \text{ } 40\% = NaOH(100\%)/0,4 \quad \text{kg/reg}$$

$$NaOH \text{ } 40\% = 115,2/0,4 = 288 \quad \text{kg/reg}$$

$$NaOH \text{ } 40\%_{lit} = \frac{NaOH \text{ } 40\%}{\rho} \quad \text{l/reg} - (\text{za } \vartheta = 20^\circ\text{C}; \rho \text{ } NaOH_{40\%} = 1,43 \text{ g/cm}^3)$$

$$NaOH \text{ } 40\%_{lit} = 288/1,43 = 201,4 \quad \text{l/reg}$$

4.1.4.2. Proračun posude za regeneraciju

$$V_p = 1,2 \cdot NaOH(40\%)_{lit} \quad \text{l}$$

$$V_p = 1,2 \cdot 201,4 = 241,68 \quad \text{l}$$

$$\text{usvaja se: } V_p = 245 \text{ l}$$

Dimenzije posude

$$H_p = 1000 \quad \text{mm} \quad - \quad \text{odabrana visina posude}$$

$$F_p = \frac{V_p}{H_p} \quad \text{m}^2 \quad - \quad \text{površina poprečnog kružnog presjeka}$$

$$F_p = \frac{0,245}{1} = 0,245 \quad \text{m}^2$$

$$\varnothing d = \frac{\sqrt[4]{F_p \cdot 4}}{\pi} \quad \text{m} \quad - \quad \text{promjer kruga poprečnog presjeka}$$

$$\varnothing d = \frac{\sqrt[4]{0,245 \cdot 4}}{\pi} = 0,558 \quad \text{m}$$

usvaja se: $\varnothing d = 600 \text{ mm}$

Debljina stijenke plašta je

$$s = \frac{d \cdot p}{20 \cdot \frac{K}{S} \cdot \nu + p} + c_1 + c_2 \quad \text{mm}$$

$p = 6$	bar	-	proračunski tlak
$d = 600$	mm	-	usvojeni promjer filtra
$S = 1,5$		-	stupanj sigurnosti za valjani i kovani čelik
$\nu = 1$		-	koeficijent oslabljenja za tlačne posude
$K = 200,5$	N/mm ²	-	proračunska čvrstoća na radnoj temp. (za Č.0361 kod 40 °C)
$c_1 = 0,5$	mm	-	dodatak za dopušteno odstupanje materijala za debeli lim
$c_2 = 1$	mm	-	dodatak za smanjenje debljine lima korozijom i trošenjem za feritne čelike

$$s = \frac{600 \cdot 6}{20 \cdot \frac{200,5}{1,5} \cdot 1 + 6} + 0,5 + 1 = 2,843 \quad \text{mm}$$

usvaja se: $s = 3 \text{ mm}$

Dimenzije posude za NaOH(40%) iznose: $\varnothing 600 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$

4.1.4.3. Proračun veličina filtra

$K_k = 0,65$ val/l - korisni volumni kapacitet ionskog izmjenjivača

$V_m = \frac{Q \cdot AT \cdot \tau}{K_k}$ l - volumen ionske mase

$$V_m = \frac{100 \cdot 1,2 \cdot 16}{0,65} = 2954 \text{ l} = 2,954 \text{ m}^3$$

usvaja se: $V_m = 2960 \text{ l}$

$$S_p = \frac{Q}{V_m} \quad (\text{m}^3/\text{h vode})/(\text{m}^3 \text{ mase}) \quad - \quad \text{specifično volumno opterećenje ionskog filtra}$$

$$S_p = \frac{100}{2,96} = 33,78 \quad (\text{m}^3/\text{h vode})/(\text{m}^3 \text{ mase})$$

$$c_p = 40 \quad \text{m/h} \quad - \quad \text{protočna brzina vode (10÷50)}$$

$$F = \frac{Q}{c_p} \quad \text{m}^2 \quad - \quad \text{površina poprečnog kružnog presjeka ionskog filtra}$$

$$F = \frac{100}{40} = 2,5 \quad \text{m}^2$$

$$d = \frac{\sqrt{4 \cdot F}}{\pi} \quad \text{m} \quad - \quad \text{promjer kruga poprečnog presjeka kolone ionskog filtra}$$

$$d = \frac{\sqrt{4 \cdot 2,5}}{\pi} = 1,784 \quad \text{m}$$

usvaja se: $\varnothing d = 1800 \quad \text{mm}$

$$H_m = \frac{V_m}{F} \quad \text{m} \quad - \quad \text{visina stupca ionske mase}$$

$$H_m = \frac{2,96}{2,5} = 1,184 \quad \text{m}$$

$$H_s = H_m + 0,1 \cdot H_m \quad \text{m} \quad - \quad \text{visina slobodnog prostora}$$

$$H_s = 1,184 + 0,1 \cdot 1,184 = 1,303 \quad \text{m}$$

$$H = 2,1 \cdot H_m \quad \text{m} \quad - \quad \text{visina kolone ionskog filtra}$$

$$H = 2,1 \cdot 1,184 = 2,486 \quad \text{m}$$

usvaja se: $H = 2500 \quad \text{mm}$

Debljina stijenke plašta je

$$s = \frac{d \cdot p}{20 \cdot \frac{K}{S} \cdot \nu + p} + c_1 + c_2 \quad \text{mm}$$

$$p = 6 \quad \text{bar} \quad - \quad \text{proračunski tlak}$$

$$d = 1800 \quad \text{mm} \quad - \quad \text{usvojeni promjer filtra}$$

$$S = 1,5 \quad - \quad \text{stupanj sigurnosti za valjani i kovani čelik}$$

$$\nu = 1 \quad - \quad \text{koeficijent oslabljenja za tlačne posude}$$

$K = 200,5$	N/mm^2	-	proračunska čvrstoća na radnoj temp. (za Č.0361 kod 40 °C)
$c_1 = 0,5$	mm	-	dodatak za dopušteno odstupanje materijala za debeli lim
$c_2 = 1$	mm	-	dodatak za smanjenje debljine lima korozijom i trošenjem za feritne čelike

$$s = \frac{1800 \cdot 6}{20 \cdot \frac{200,5}{1,5} \cdot 1 + 6} + 0,5 + 1 = 5,53 \quad \text{mm}$$

usvaja se: $s = 6 \text{ mm}$

Dimenzije jako kiselog kationskog izmjenjivača iznose: $\emptyset 1800 \text{ mm} \times 2500 \text{ mm} \times 6 \text{ m}$

4.1.5. Potrošnja energije linije za demineralizaciju

Potrošnju energije čine dvije identične pumpe za demineralizaciju, dvije identične pumpe za regeneraciju te ventilator.

- Snaga pumpe za demineralizaciju je:

$$Q = 100 \text{ m}^3/\text{h} = 0,02777 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta p = 2,5 \text{ bar} = 250000 \text{ Pa}$$

$$\eta = 0,7$$

$$P = \frac{\Delta p \cdot Q}{\eta}$$

$$P = \frac{250000 \cdot 0,02777}{0,7} = 9920,6 \text{ W} = 9,9206 \text{ kW}$$

usvaja se: $P = 10 \text{ kW}$

Specifična potrošnja energije jedne pumpe je;

$$\frac{P}{Q} = \frac{10}{100} = 0,1 \text{ kWh/m}^3.$$

- Snaga pumpe za regeneraciju je:

$$Q = 3 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0008333 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta p = 2 \text{ bar} = 200000 \text{ Pa}$$

$$\eta = 0,7$$

$$P = \frac{\Delta p \cdot Q}{\eta}$$

$$P = \frac{200000 \cdot 0,0008333}{0,7} = 238 \text{ W} = 0,238 \text{ kW}$$

usvaja se: $P = 0,25 \text{ kW}$

Specifična potrošnja energije jedne pumpe je; $\frac{P}{Q} = \frac{0,25}{100} = 0,0025 \text{ kWh/m}^3$.

- Snaga ventilatora je:

$$Q = 5000 \text{ m}^3/\text{h} = 1,389 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta p = 0,025 \text{ bar} = 2500 \text{ Pa}$$

$$\eta = 0,7$$

$$P = \frac{\Delta p \cdot Q}{\eta}$$

$$P = \frac{2500 \cdot 1,389}{0,7} = 4960,7 \text{ W} = 4,9607 \text{ kW}$$

usvaja se: $P = 5 \text{ kW}$

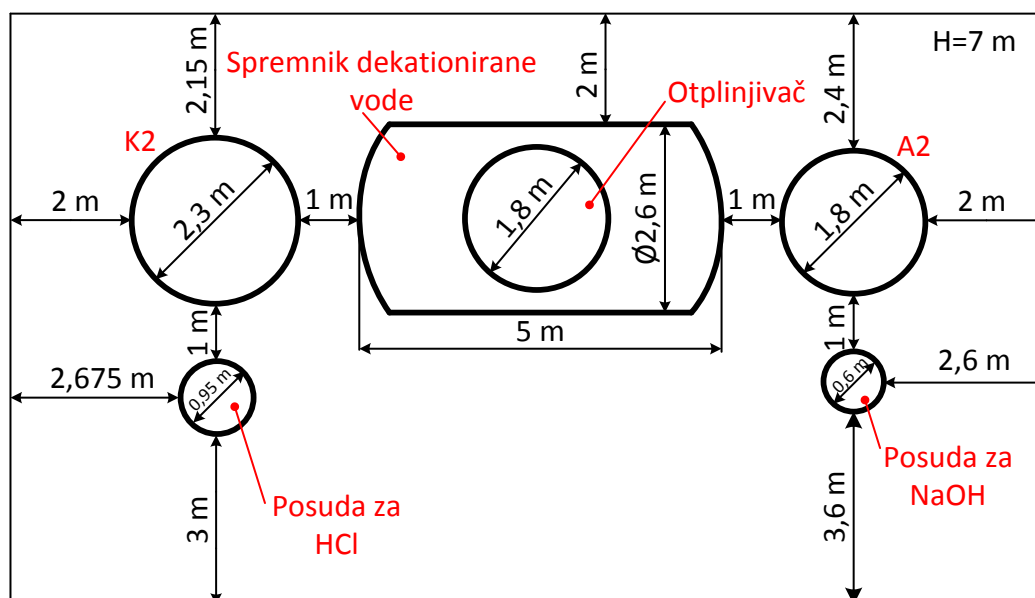
Specifična potrošnja energije ventilatora je; $\frac{P}{Q} = \frac{5}{5000} = 0,001 \text{ kWh/m}^3$

Ukupna specifična potrošnja energije linije za demineralizaciju je;

$$2 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,0025 + 0,001 = 0,206 \text{ kWh/m}^3.$$

4.1.6. Dispozicija opreme i zahtjevi na prostor

Oprema u prostoru mora biti smještena na način da se omogući nesmetan pristup, a međusobni razmak mora biti dovoljan za smještaj cijevi i priključaka. Razmak oko opreme od min. 2 m omogućava u slučaju kvara pristup viličarom. Prostor između dviju posuda za regeneraciju površinom je dovoljan za obavljanje remonta.



Slika 6. Smještaj opreme linije za demineralizaciju

4.1.7. Ekonomska analiza

U tablici je dan popis opreme linije za demineralizaciju. Broj komada pumpi i broj ventilatora uzet je dvostruko puta veći zbog remonta ili mogućnosti kvara, kako bi sustav mogao bez poteškoća funkcionirati.

Tablica 9. Popis opreme linije za demineralizaciju

Oprema	Broj komada	Dimenzije (mm)	Volumen (l)	Snaga (kW)
K2 posuda	1	$\varnothing 2300 \times 3200 \times 7$	13500	-
K2 masa	-	-	6020	-
Posuda za HCl (30%)	1	$\varnothing 950 \times 1500 \times 4$	1005	-
Pumpa za HCl (30%)	2	-	-	0,25
Otplinjivač	1	$\varnothing 1800 \times 3000 \times 6$	8000	-
Spremnik dekationirane vode	1	$\varnothing 2600 \times 4000 \times 7,5$	21500	-
A2 posuda	1	$\varnothing 1800 \times 2500 \times 6$	6500	-
A2 masa	-	-	2960	-
Posuda za NaOH (40%)	1	$\varnothing 600 \times 1000 \times 3$	245	-
Pumpa za NaOH (40%)	2	-	-	0,25
Pumpa za demineralizaciju	4	-	-	10
Ventilator	2	-	-	5

4.1.7.1. Investicijski troškovi

Tablica 10. Procjena investicijskih troškova linije za demineralizaciju

Oprema	Jedinična cijena (kn)	Ukupna cijena (kn)
K2 posuda	67000	67000
K2 masa	14	84280
Posuda za HCl (30%)	5000	5000
Pumpa za HCl (30%)	1000	1000
Otplinjivač	55000	55000
Spremnik dekontaminirane vode	24000	24000
A2 posuda	47000	47000
A2 masa	46,7	138232
Posuda za NaOH (40%)	1200	1200
Pumpa za NaOH (40%)	1500	1500
Pumpa za demineralizaciju	28000	112000
Ventilator	4500	4500

Ukupni investicijski troškovi procjenjuju se na 540712 kn

4.1.7.2. Pogonski troškovi

Pogonski troškovi obuhvaćaju:

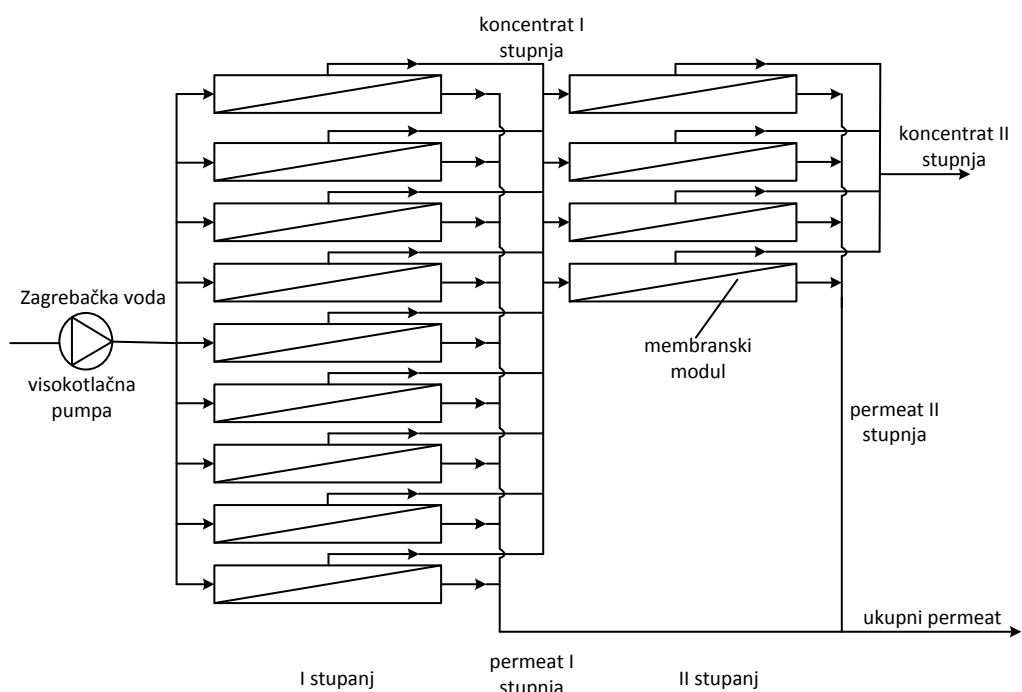
- redoviti servis koji se izračunava kao;
 $20\% \text{ ukupne cijene mase} + 22500 \text{ kn} = 67002,4 \text{ kn/god,}$
dnevna proizvodnja vode je $100 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 16 \text{ h} = 1600 \text{ m}^3$ pa se dobi
 $67002,4 \text{ kn/god} \cdot 1/(365 \text{ dana} \cdot 1600 \text{ m}^3) = 0,115 \text{ kn/ m}^3$
- potrošnju HCl (30%);
cijena HCl je 1,5 kn/kg pa slijedi,
 $959,62 \text{ kg /reg} \cdot 1,5 \text{ kn/kg} = 1439,43 \text{ kn/reg,}$
dnevna proizvodnja vode je $100 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 16 \text{ h} = 1600 \text{ m}^3$ pa se dobi $0,9 \text{ kn/ m}^3$ ili
 $0,9 \text{ kn/ m}^3 \cdot 1600 \text{ m}^3 \cdot 365 \text{ dana} = 525600 \text{ kn/god}$

- potrošnju NaOH (40%);
cijena NaOH je 3 kn/kg pa slijedi,
 $288 \text{ kg/reg} \cdot 3 \text{ kn/kg} = 864 \text{ kn/reg}$,
dnevna proizvodnja vode je $100 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 16 \text{ h} = 1600 \text{ m}^3$ pa se dobi $0,54 \text{ kn/m}^3$ ili
 $0,54 \text{ kn/m}^3 \cdot 1600 \text{ m}^3 \cdot 365 \text{ dana} = 315360 \text{ kn/god}$

Ukupni pogonski troškovi linije za demineralizaciju su $1,555 \text{ kn/m}^3$ odnosno $907962,4 \text{ kn/god}$

4.2. Reverzna osmoza

Pomoću programa ROSA za Zagrebačku vodu i ukupni protok permeata od $100 \text{ m}^3/\text{h}$ dobe se svi relevantni parametri RO sustava.



Slika 7. RO sustav

Ovaj sustav reverzne osmoze sastoji se iz dva stupnja. Prvi stupanj sastoji se iz 9 modula pri čemu se u svakom nalazi 6 membrana a drugi stupanj sastoji se iz 4 modula kod kojih se također u svakom nalaze 6 membrane. Sveukupno ima 90 membrana. Svi moduli prvog stupnja kao i svi moduli drugog stupnja paralelno su spojeni.

Tablica 11. Protoci i tlakovi RO sustava

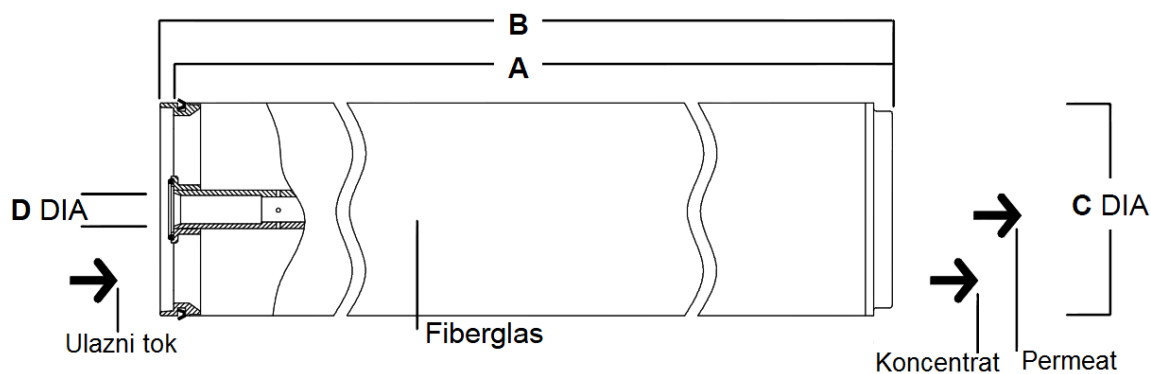
Stupanj	Tip membrane	Broj modula	Broj membrana	Ulazni tok (m ³ /h)	Ulazni tlak (bar)	Tok konc. (m ³ /h)	Tlak konc. (bar)	Tok perm. (m ³ /h)
1	HRLE-440i	9	6	125	12,56	49,85	10,42	75,15
2	HRLE-440i	4	6	49,85	10,08	25	8,08	24,84

Pomoću pumpe Zagrebačka voda sa protokom od 125 m³/h najprije ulazi u prvi stupanj, raspoređuje po modulima i filtrira. Koncentrat prvog stupnja se dodatno dorađuje u drugom stupnju podjelom na 5 modula. Nastali permeat drugog stupnja zajedno sa prvim čini protok od 100 m³/h kojim se nadopunjuje vrelovodni sustav, dok je koncentrat drugog stupnja spreman za odlaganje.

Tablica 12. Kvaliteta vode RO sustava

Ime	Ulazna struja	Koncentrat		Permeat		
		Stupanj 1	Stupanj 2	Stupanj 1	Stupanj 2	Ukupno
NH ₄ (mg/l)	0	0	0	0	0	0
K (mg/l)	2,1	5,23	10,33	0,03	0,09	0,04
Na (mg/l)	20,5	51,14	101,37	0,18	0,58	0,28
Mg (mg/l)	36	90,07	179,15	0,14	0,43	0,21
Ca (mg/l)	120	300,27	597,23	0,44	1,41	0,68
Sr (mg/l)	0	0	0	0	0	0
Ba (mg/l)	0	0	0	0	0	0
CO ₃ (mg/l)	0,53	3,83	16,37	0	0	0
HCO ₃ (mg/l)	482,49	1202,03	2372,74	2,44	6,24	3,32
NO ₃ (mg/l)	24,3	60,2	118,43	0,49	1,59	0,77
Cl (mg/l)	33,57	84,07	167,34	0,08	0,27	0,13
F (mg/l)	0,05	0,12	0,25	0	0	0
SO ₄ (mg/l)	30,09	75,39	150,18	0,04	0,13	0,06
SiO ₂ (mg/l)	0	0	0	0	0	0
Boron (mg/l)	0	0	0	0	0	0
CO ₂ (mg/l)	45,29	46,72	51,82	45,15	47,84	45,86
TDS (mg/l)	749,63	1872,35	3713,38	3,84	10,74	5,49
pH	7,2	7,53	7,73	5,03	5,4	5,15

Za analizu je uzeta DOW FILMTEC HRLE-440i membrana.



Slika 8. Membrana HRLE-440i

- Dimenzije membrane: A=1016 mm
B=1029 mm
C=201 mm
D=29 mm
- Karakteristike membrane: materijal; kompozitna poliamidna
max. temp.; 40 °C
max. tlak; 41 bar
max. pad tlaka; 1 bar
pH; 2÷11
max. tok na ulazu; 19 m³/h
aktivna površina; 41 m²

4.2.1. Potrošnja kemikalija

Od kemikalija koje se dodaju su:

- antiskalant za sprečavanje taloženja kamenca na membrane; 0,005 kg/m³
- H₂SO₄ za regulaciju pH; 0,00203 kg/m³

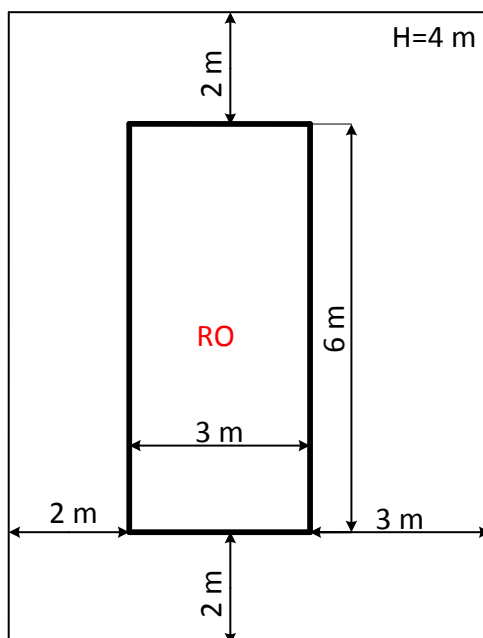
4.2.2. Potrošnja energije

Snaga visokotlačne pumpe je 60 kW, a specifična potrošnja energije ovakvog sustava je

0,6 kWh/m³.

4.2.3. Dispozicija opreme i zahtjevi na prostor

RO sustav smješten je s razmakom od min. 2 m od zidova da bi se mogle smjestiti cijevi i prolaziti sa viličarom. Veća površina na slici može poslužiti za remont. Sustav se sastoji od rešetke 4 x 4 reda u kojoj se nalazi 13 modula duljine 6 m. Međusobni razmak između modula je 0,732 m.



Slika 9. Smještaj RO sustava

4.2.4. Ekonomska analiza

Tablica 13. Popis opreme RO sustava

Oprema	Broj komada	Snaga (kW)
Membrana (HRLE-440i)	78	-
RO modul	13	-
Pumpa (kW)	2	60

Uzete su dvije pumpe, pri čemu jedna služi kao rezerva.

4.2.4.1. Investicijski troškovi

Tablica 14. Procjena investicijskih troškova RO sustava

Oprema	Jedinična cijena (kn)	Ukupna cijena (kn)
Membrana (HRLE-440i)	3500	273000
RO modul	9000	117000
Pumpa (kW)	40000	80000

Ukupni investicijski troškovi procjenjuju se na 470000 kn.

4.2.4.2. Pogonski troškovi

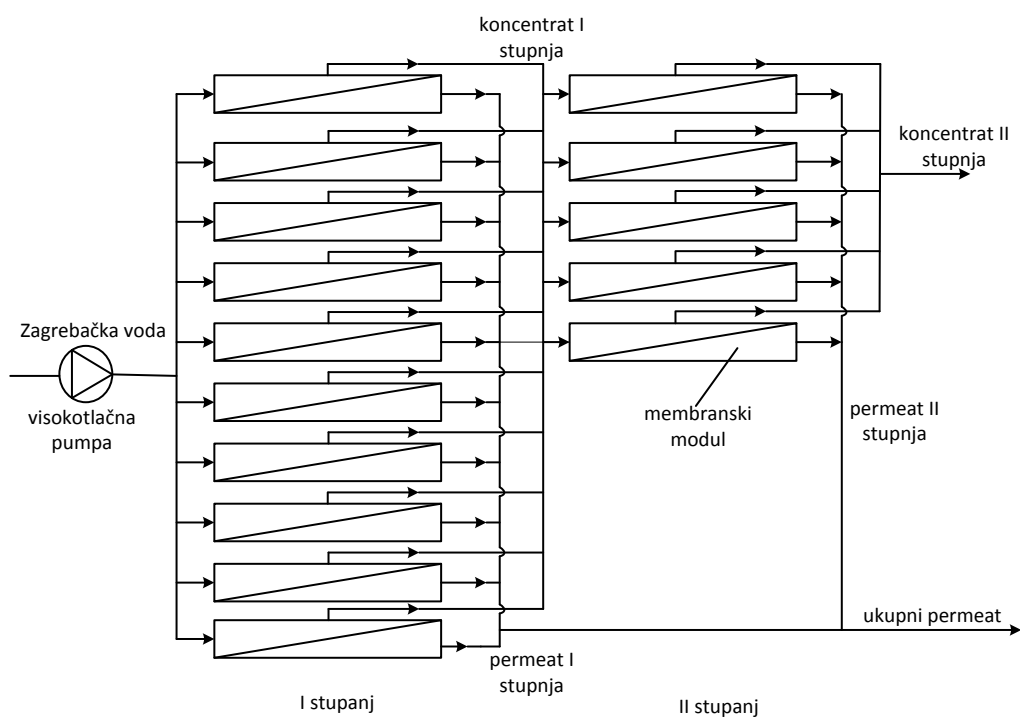
Pogonski troškovi obuhvaćaju:

- redoviti servis koji se izračunava kao;
 $20\% \text{ ukupne cijene membrana} + 4000 \text{ kn} = 58600 \text{ kn/god,}$
dnevna proizvodnja vode je $100 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 16 \text{ h} = 1600 \text{ m}^3$ pa se dobi
 $58600 \text{ kn/god} \cdot 1/(365 \text{ dana} \cdot 1600 \text{ m}^3) = 0,1 \text{ kn/ m}^3$
- potrošnju antiskalanta;
cijena je 60 kn/kg pa slijedi,
 $0,005 \text{ kg/m}^3 \cdot 60 \text{ kn/kg} = 0,3 \text{ kn/m}^3$ ili
 $0,3 \text{ kn/ m}^3 \cdot 1600 \text{ m}^3 \cdot 365 \text{ dana} = 175200 \text{ kn/god}$
- potrošnju H_2SO_4 (100%);
cijena je 2 kn/kg pa slijedi,
 $0,00203 \text{ kg/m}^3 \cdot 2 \text{ kn/kg} = 0,00406 \text{ kn/m}^3$ ili
 $0,00406 \text{ kn/ m}^3 \cdot 1600 \text{ m}^3 \cdot 365 \text{ dana} = 2371,04 \text{ kn/god}$

Ukupni pogonski troškovi RO sustava su $0,40406 \text{ kn/ m}^3$ odnosno $236171,04 \text{ kn/god.}$

4.3. Nanofiltracija

Kao kod sustava reverzne osmoze i ovdje se pomoću programa ROSA dobe svi potrebni podaci.



Slika 10. NF sustav

Sustav se sastoji od dva stupnja a princip rada uređaja identičan je principu rada reverzne osmoze kako što je prije objašnjeno.

Tablica 15. Protoci i tlakovi NF sustava

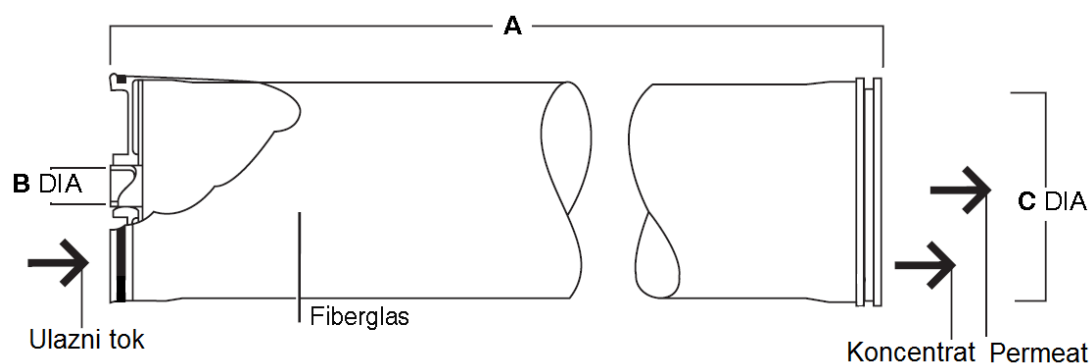
Stupanj	Tip membrane	Broj modula	Broj membrana	Ulazni tok (m ³ /h)	Ulazni tlak (bar)	Tok konc. (m ³ /h)	Tlak konc. (bar)	Tok perm. (m ³ /h)
1	NF90-400	10	6	125	7,94	47,91	5,97	77,09
2	NF90-401	5	6	47,91	5,63	25	4,1	22,91

Na osnovu dobivenih podataka iz Tablice 15. može se uočiti da su tlakovi kod nanofiltracijskog uređaja u usporedbi sa reverznom osmozom znatno manji. Voda je nešto lošije kvalitete odnosno membrana je protočnija (Tablica 2), ima više modula, ali se znatna potencijalna ušteda krije u snazi pumpe.

Tablica 16. Kvaliteta vode NF sustava

Ime	Ulazna struja	Koncentrat		Permeat		
		Stupanj 1	Stupanj 2	Stupanj 1	Stupanj 2	Ukupno
NH ₄ (mg/l)	0	0	0	0	0	0
K (mg/l)	2,1	4,38	6,81	0,68	1,74	0,92
Na (mg/l)	20,5	49,74	89,32	2,33	6,55	3,3
Mg (mg/l)	36	92,7	175,37	0,76	2,5	1,16
Ca (mg/l)	120	309,14	584,98	2,46	8,16	3,76
Sr (mg/l)	0	0	0	0	0	0
Ba (mg/l)	0	0	0	0	0	0
CO ₃ (mg/l)	0,53	4,09	15,75	0	0	0
HCO ₃ (mg/l)	482,49	1239,16	2331,23	8,98	30,04	13,78
NO ₃ (mg/l)	24,3	50,95	78,87	7,74	20,48	10,66
Cl (mg/l)	33,57	85,85	161,05	1,09	3,79	1,71
F (mg/l)	0,05	0,13	0,23	0	0,01	0
SO ₄ (mg/l)	30,09	78,2	149,3	0,19	0,62	0,29
SiO ₂ (mg/l)	0	0	0	0	0	0
Boron (mg/l)	0	0	0	0	0	0
CO ₂ (mg/l)	45,29	46,82	51,53	45,45	47,97	46,04
TDS (mg/l)	749,63	1914,34	3592,91	24,23	73,88	35,57
pH (mg/l)	7,2	7,54	7,72	5,57	6,05	5,75

Kod nanofiltracijskog sustava uzeta je DOW FILMTEC NF90-400 membrana.



Slika 11. Membrana NF90-400

- Dimenzije membrane: $A=1016 \text{ mm}$
 $B=38 \text{ mm}$
 $C=201 \text{ mm}$

- Karakteristike membrane: materijal; kompozitna poliamidna
 max. temp.; $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 max. tlak; 41 bar
 max. pad tlaka; 1 bar
 pH; $3\div 10$
 max. tok na ulazu; $15,9 \text{ m}^3/\text{h}$
 aktivna površina; 37 m^2

4.3.1. Potrošnja kemikalija

Od kemikalija koje se dodaju su:

- antiskalanat za sprečavanje taloženja kamenca na membrane; $0,005 \text{ kg/m}^3$
- H_2SO_4 za regulaciju pH; $0,00203 \text{ kg/m}^3$

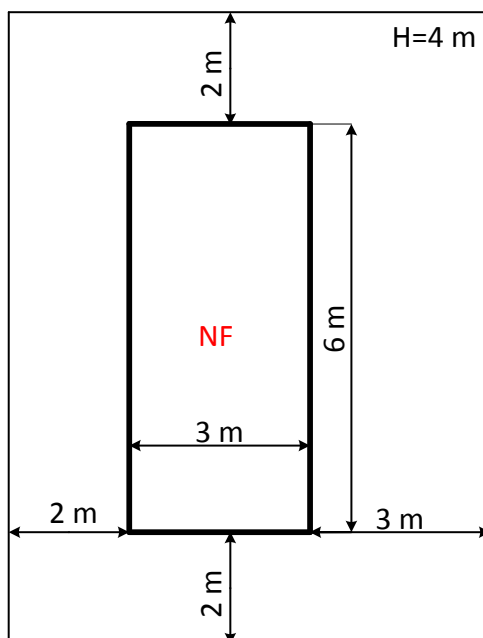
4.3.2. Potrošnja energije

Snaga visokotlačne pumpe je 40 kW , a specifična potrošnja energije ovakvog sustava je

$0,4 \text{ kWh/m}^3$.

4.3.3. Dispozicija opreme i zahtjevi na prostor

NF sustav smješten je s razmakom od min. 2 m od zidova da bi se mogle smjestiti cijevi i prolaziti sa viličarom. Veća površina na slici može poslužiti za remont. Sustav se sastoji od rešetke 4 x 4 reda u kojoj se nalazi 15 modula duljine 6 m. Međusobni razmak između modula je 0,732 m.



Slika 12. Smještaj NF sustava

4.3.4. Ekonomska analiza

Tablica 17. Popis opreme NF sustava

Oprema	Broj komada	Snaga (kW)
Membrana (NF90-400)	90	-
RO modul	15	-
Pumpa (kW)	2	40

Kao i kod RO sustava i ovdje su uzete dvije pumpe, pri čemu jedna služi kao rezerva.

4.3.4.1. *Investicijski troškovi***Tablica 18. Procjena investicijskih troškova NF sustava**

Oprema	Jedinična cijena (kn)	Ukupna cijena (kn)
Membrana (NF90-400)	3000	270000
RO modul	9000	135000
Pumpa (kW)	25000	50000

Ukupni investicijski troškovi procjenjuju se na 455000 kn.

4.3.4.2. *Pogonski troškovi*

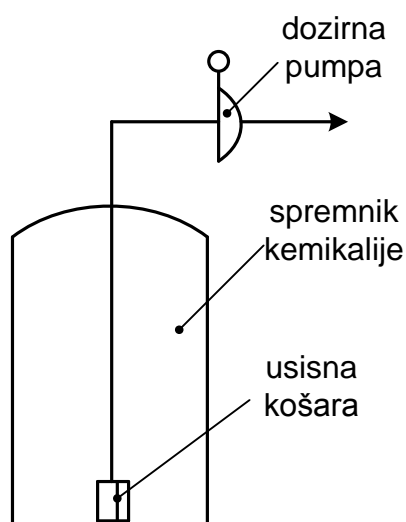
Pogonski troškovi obuhvaćaju:

- redoviti servis koji se izračunava kao;
 $20\% \text{ ukupne cijene membrana} + 4000 \text{ kn} = 58000 \text{ kn/god,}$
dnevna proizvodnja vode je $100 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 16 \text{ h} = 1600 \text{ m}^3$ pa se dobi
 $58000 \text{ kn/god} \cdot 1/(365 \text{ dana} \cdot 1600 \text{ m}^3) = 0,0994 \text{ kn/ m}^3$
- potrošnju antiskalanta;
cijena je 60 kn/kg pa slijedi,
 $0,005 \text{ kg/m}^3 \cdot 60 \text{ kn/kg} = 0,3 \text{ kn/m}^3$ ili
 $0,3 \text{ kn/ m}^3 \cdot 1600 \text{ m}^3 \cdot 365 \text{ dana} = 175200 \text{ kn/god}$
- potrošnju H_2SO_4 (100%);
cijena je 2 kn/kg pa slijedi,
 $0,00203 \text{ kg/m}^3 \cdot 2 \text{ kn/kg} = 0,00406 \text{ kn/m}^3$ ili
 $0,00406 \text{ kn/ m}^3 \cdot 1600 \text{ m}^3 \cdot 365 \text{ dana} = 2371,04 \text{ kn/god}$

Ukupni pogonski troškovi NF sustava su $0,4034 \text{ kn/ m}^3$ odnosno 235571,04 kn/god.

4.4. Kemijsko kondicioniranje

Postoji mnogo različitih kemijskih tvari koje su najčešće na bazi nitrata, polifosfata i silikata a služe kao inhibitori kamenca i korozije. Doza kemikalije ovisi o kvaliteti vode, pa tako dosta tvrda voda kao što je Zagrebačka zahtijeva veliki utrošak kemikalije. Trajno doziranje takve kemikalije opasno je glede rukovanja i ekološki neprihvatljivo, a i cijena je visoka. Zato se ova varijanta radi u iznimnim situacijama kao što su havarije, ili se dozira u malim količinama nakon npr. nanofiltracije. Sustav je vrlo jednostavan te se sastoji iz spremnika i dozirne crpke. Doziranje pomoću dozirne crpke vrši se proporcionalno protoku vode, a doza ovisi o sastavu ulazne vode.



Slika 13. Shema kemijskog kondicioniranja

4.4.1. Potrošnja kemikalija

Potrošnja kemikalije je cca $0,025 \text{ kg/m}^3$.

4.4.2. Potrošnja energije

Snaga pumpe je $0,5 \text{ kW}$, a specifična potrošnja energije ovakvog sustava je

$0,005 \text{ kWh/m}^3$.

4.4.3. Dispozicija opreme i zahtjevi na prostor

Za spremnik od 1 m³ i dozirnu pumpu dovoljna je prostorija od 20 m² visine 3 m pri čemu je i dovoljno mjesta za prolaz viličarom.

4.4.4. Ekonomska analiza

Oprema obuhvaća pumpu od 0,5 kW i spremnik 1 m³.

4.4.4.1. Investicijski troškovi

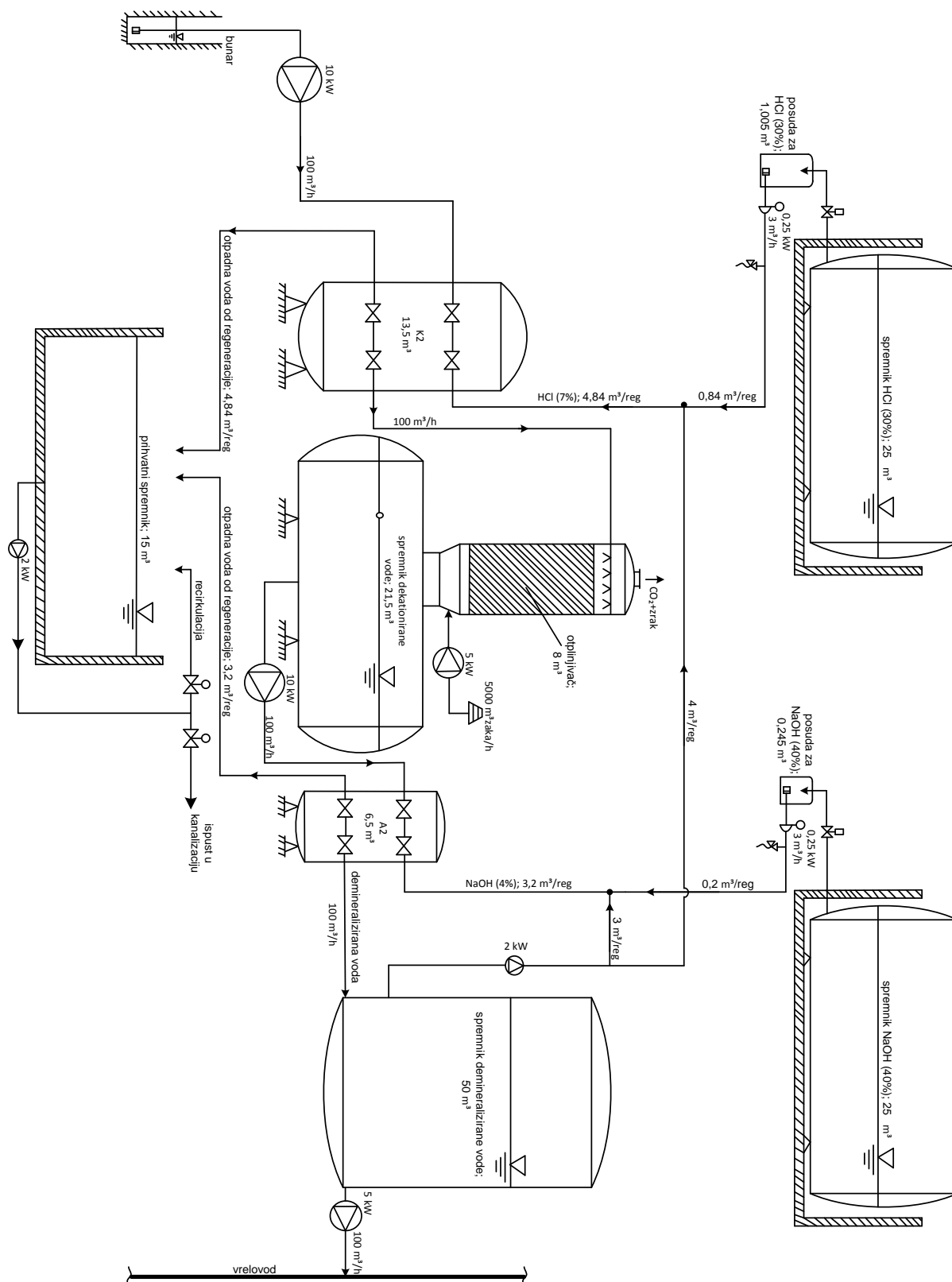
Ukupni investicijski troškovi procjenjuju se na 10000 kn.

4.4.4.2. Pogonski troškovi

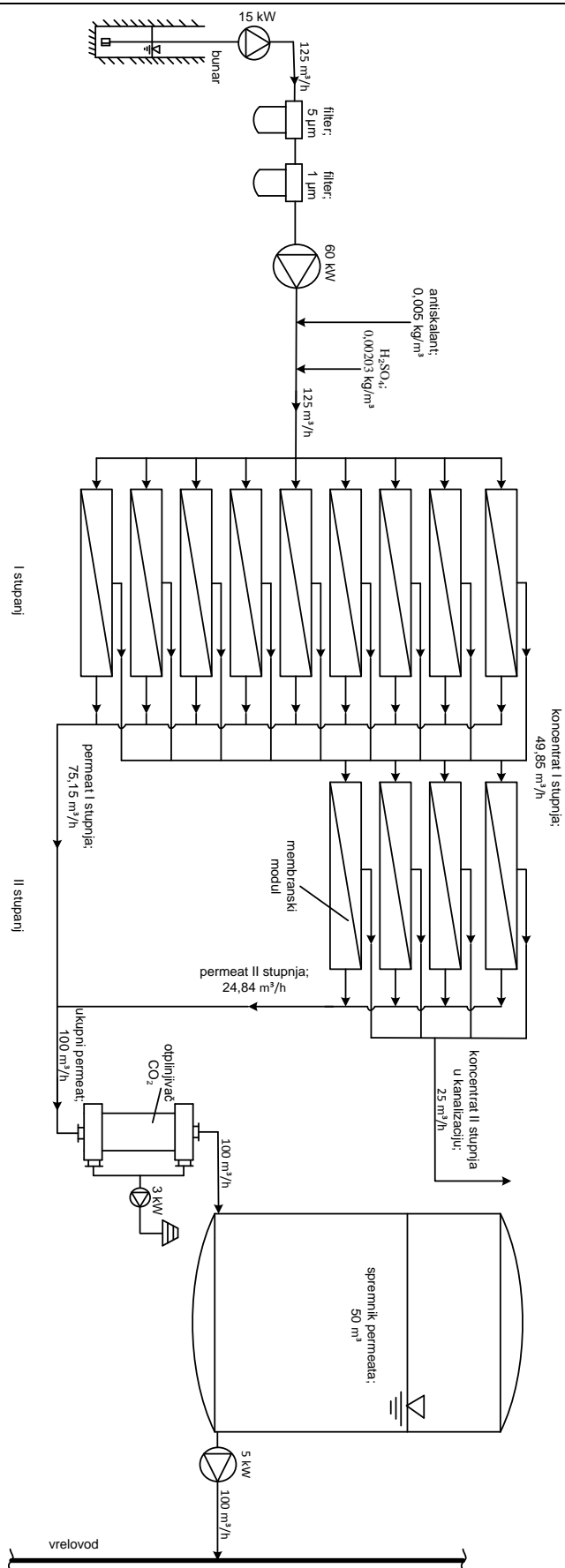
Pogonski trošak obuhvaća:

- potrošnju kemikalije;
cijena je 60 kn/kg pa slijedi,
 $0,025 \text{ kg/m}^3 \cdot 60 \text{ kn/kg} = 1,5 \text{ kn/m}^3$ ili
 $1,5 \text{ kn/m}^3 \cdot 1600 \text{ m}^3 \cdot 365 \text{ dana} = 876000 \text{ kn/god}$

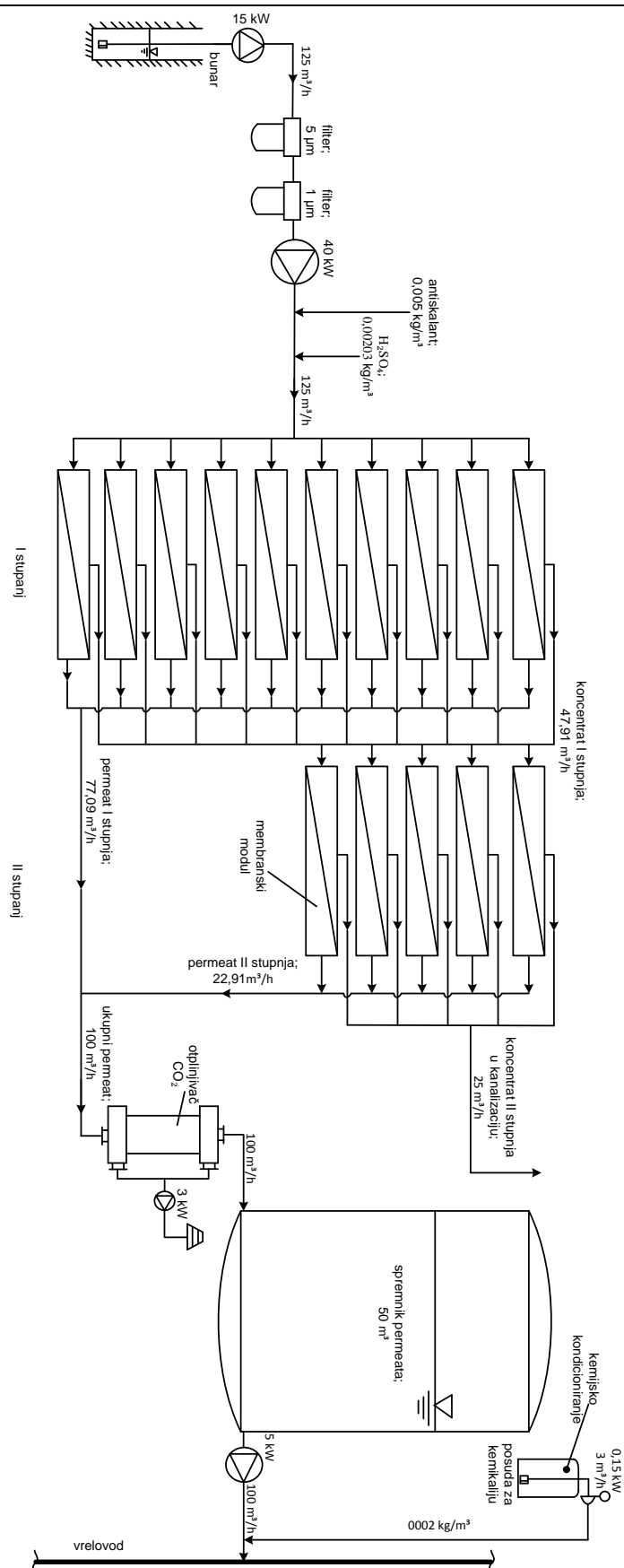
4.5. Tehnološke sheme sustava



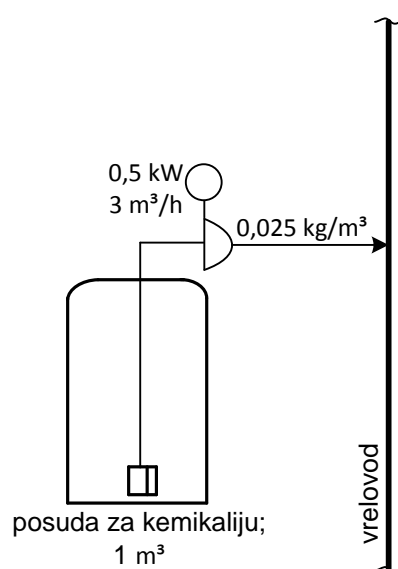
Slika 14. Tehnološka shema linije za demineralizaciju



Slika 15. Tehnološka shema RO sustava



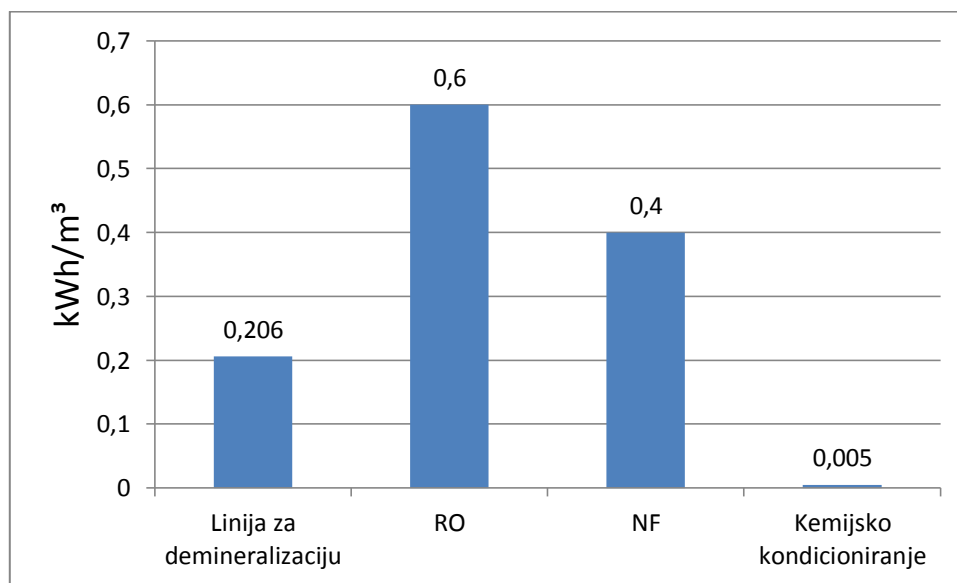
Slika 16. Tehnološka shema NF sustava



Slika 17. Tehnološka shema kemijskog kondicioniranja

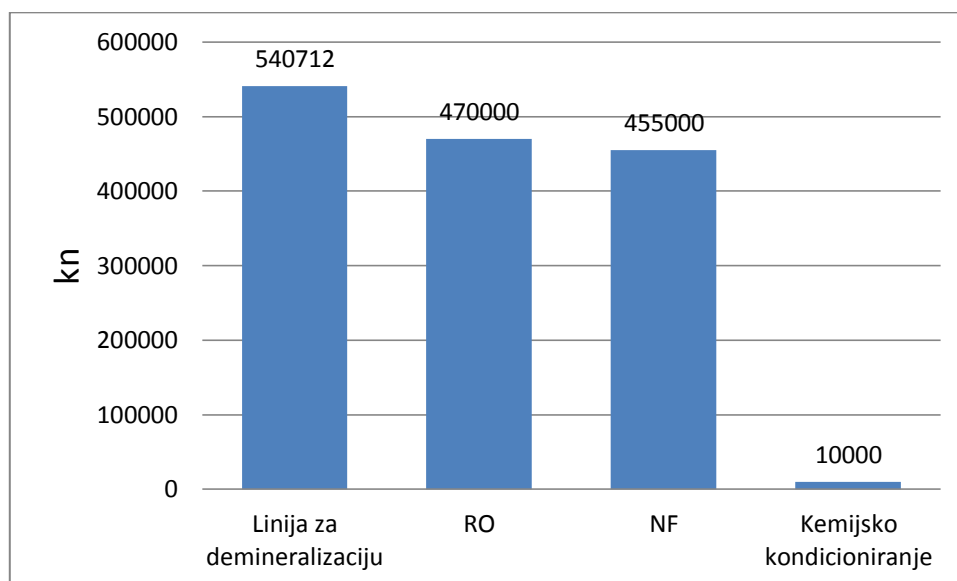
5. USPOREDBA REZULTATA

5.1. Specifična potrošnja energije



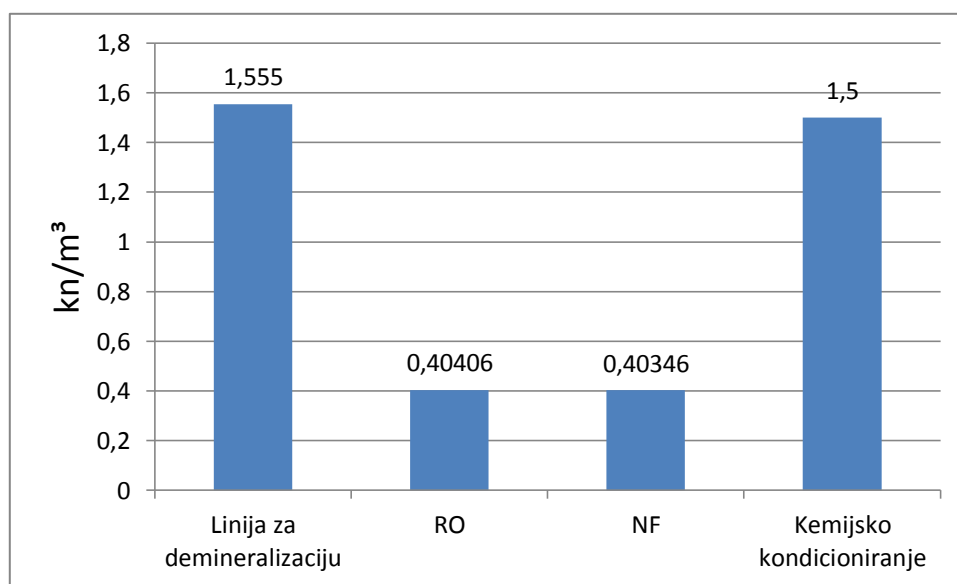
Slika 18. Usporedba specifične potrošnje energije

5.2. Investicijski troškovi



Slika 19. Usporedba investicijskih troškova

5.3. Pogonski troškovi



Slika 20. Usporedba pogonskih troškova

6. ZAKLJUČAK

Iako se svakom od tehnoloških varijanti može osigurati funkcionalnost sustava, provedena analize ukazuje na velike razlike među njima.

Linija za demineralizaciju zahtjeva najveći prostor za smještaj opreme, te ima najveće investicijske i pogonske troškove.

Najprihvatljivija varijanta što se tiče prostora i investicijskih troškova je kemijsko kondicioniranje bez prethodnog tretmana vode, ali se zbog velikog utroška energije ne može smatrati kao trajno rješenje.

Primjena kemijskog kondicioniranja potrebna je i kod djelomične demineralizacije membranskom nanofiltracijom, ali uz višestruko smanjene doze. Stoga je kod varijante membranske nanofiltracije neznatno povećan investicijski i pogonski trošak pa je približno izjednačen investicijskom i pogonskom trošku reverzno osmotskog sustava.

Najveći specifični utrošak energije je kod reverzno osmotskog sustava, no to ne mora biti odlučujuće za izbor najpovoljnije varijante jer se pogon nalazi u okviru termoelektrane gdje električna energija ima lokalnu a ne tržišnu vrijednost.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnološke sheme varijanti

LITERATURA

- [1] http://www.ktf-split.hr/bib/vjezbe_iz_tehnoloskih_procesa_anorganske_industrije.pdf (9.2011.)
- [2] http://www.fkit.unizg.hr/files/nastava/zfk/Fizikalno_kemijski_procesi_obradbe_voda.pdf (9.2011.)
- [3] http://www.ktf-split.hr/bib/vjezbe_iz_tehnoloskih_procesa_anorganske_industrije.pdf (9.2011.)
- [4] <http://www.hep.hr/proizvodnja/osnovni/termoelektrane/teto.aspx> (9.2011.)
- [5] <http://www.cwg.rs/files/REVERZNA%20OSMOZA%20CWG%20BALKAN.pdf> (9.2011.)
- [6] <http://www.dowwaterandprocess.com/products/ronf.htm> (9.2011.)
- [7] http://www.dowwaterandprocess.com/support_training/design_tools/rosa.htm (9.2011.)
- [8] Srećko Rundek, Davor Krilić: TE-TO Zagreb, Hrvatska elektroprivreda d.d., Zagreb 2003.
- [9] Dobrović S.: Predavanja iz kolegija „Voda, gorivo i mazivo“, Zagreb, 2010/2011.
- [10] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.